

공학석사 학위논문

극지 운용 반잠수식 시추선의 내빙구조 보강에 대한 연구

Ice Strengthening of Semi-submersible Drilling Rig
Operating in Polar Regions



지도교수 최경식

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

민 준 기

本 論文을 閔俊基의 工學碩士 學位論文으로
認准함.

위원장 공학박사 서 영 교 (인)

위 원 공학박사 남 중 호 (인)

위 원 공학박사 최 경 식 (인)



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

민 준 기

<목 차>

목 차	i
그림 목차	ii
표 목차	iv
Abstract	v
1. 서 론	1
1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 논문의 구성	2
2. 규정에 따른 내빙구조 보강	3
2.1 빙규정에 대한 고찰	3
2.2 선각 보강물량	6
2.3 유한요소법에 의한 강도 평가	13
2.3.1 유한요소 모델	14
2.3.2 경계 및 하중조건	16
2.3.3 강도 평가결과	20
3. 유빙에 대한 선각 보강	25
3.1 보강방법 고찰	25
3.2 Tension Wire 구조	26
3.3 Ring Clamp 구조	28
3.4 Ice Knife 구조	29
3.5 강도 개선효과 고찰	31
3.5.1 Tension Wire 구조	31
3.5.1.1 강도 평가방법	31
3.5.1.2 강도 평가결과	33
3.5.2 Ice Knife 구조	38
3.5.2.1 강도 평가방법	38
3.5.2.2 강도 평가결과	40
4. 결 론	45
참고문헌	46

<그림 목차>

그림 1.1	시추설비의 지역별 구분	1
그림 2.1	선박 및 해양구조물에 적용되는 빙강도 규정	3
그림 2.2	선박의 내빙 보강구역	6
그림 2.3	반잠수식 시추선의 내빙 보강구역	7
그림 2.4	반잠수식 시추선의 ICE-L 적용 시 선각 물량 증가비	10
그림 2.5	반잠수식 시추선의 ICE-T 적용 시 선각 물량 증가비	10
그림 2.6	반잠수식 시추선의 ICE-L과 ICE-T 적용 시 선각 물량 증가비	11
그림 2.7	반잠수식 시추선의 ICE-L 혹은 ICE-T 적용 시 선각 물량 증가비	11
그림 2.8	기둥 전체의 유한요소 모델	14
그림 2.9	기둥 내부재들의 유한요소 모델	15
그림 2.10	기둥 유한요소 모델의 경계조건	16
그림 2.11	빙하중이 작용하는 폭과 높이, 면적	16
그림 2.12	빙하중과 면적간의 관계	17
그림 2.13	하중조건 1의 빙하중 형상 및 위치	18
그림 2.14	하중조건 2의 빙하중 형상 및 위치	18
그림 2.15	하중조건 3의 빙하중 형상 및 위치	19
그림 2.16	하중조건 4의 빙하중 형상 및 위치	19
그림 2.17	하중조건 1의 von-Mises Stress	20
그림 2.18	하중조건 2의 von-Mises Stress	21
그림 2.19	하중조건 3의 von-Mises Stress	22
그림 2.20	하중조건 4의 von-Mises Stress	23
그림 3.1	반잠수식 시추선의 유빙 충돌구역	25
그림 3.2	반잠수식 시추선의 Tension Wire 구조	26
그림 3.3	해양계류용 Steel Wire 종류	27
그림 3.4	반잠수식 시추선의 Ring Clamp 구조	28
그림 3.5	선박의 선수부 Ice Knife	29
그림 3.6	반잠수식 시추선의 Ice Knife 구조	29
그림 3.7	Spar 해양구조물의 와류유기진동 저감 구조	30
그림 3.8	탈부착식 Ice Knife 구조	30
그림 3.9	Case 1의 Tension Wire 형상	32
그림 3.10	Case 2의 Tension Wire 형상	32

그림 3.11 Case 3의 Tension Wire 형상	33
그림 3.12 Tension Wire Case 1의 von-Mises Stress	34
그림 3.13 Tension Wire Case 2의 von-Mises Stress	35
그림 3.14 Tension Wire Case 3의 von-Mises Stress	36
그림 3.15 Case 1의 Ice Knife 형상	39
그림 3.16 Case 2의 Ice Knife 형상	39
그림 3.17 Case 3의 Ice Knife 형상	40
그림 3.18 Ice Knife Case 1의 von-Mises Stress	41
그림 3.19 Ice Knife Case 2의 von-Mises Stress	42
그림 3.20 Ice Knife Case 3의 von-Mises Stress	43



<표 목차>

표 2.1 노르웨이선급(DNV) 해양구조물의 빙상조건에 따른 입급 표시	4
표 2.2 Baltic 내빙구조 보강을 위한 기본정보 및 보강치수	9
표 2.3 1A Super 적용에 따른 반잠수식 시추선 기둥의 내빙구조 보강치수	13
표 2.4 빙하중의 형상 및 위치에 따른 하중조건	17
표 2.5 하중조건에 따른 부위별 최대 von-Mises Stress	24
표 3.1 Tension Wire 구조의 강도 평가 계산에	31
표 3.2 Tension Wire 형상에 따른 최대 von-Mises Stress	37
표 3.3 Ice Knife 구조의 강도 평가 계산에	38
표 3.4 Ice Knife 형상에 따른 최대 von-Mises Stress	44



Ice Strengthening of Semi-submersible Drilling Rig Operating in Polar Regions

by
JUN-KI MIN

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime University



Abstract

Recently, the demands for the semi-submersible drilling rig operating in polar region have been highly increased, because the semi-submersible drilling rig has a strong point in view of motion characteristics in harsh environment.

This study focuses on the ice strengthening of the semi-submersible drilling rig operating in polar region. Ice regulations for the rig, based on classification societies rules, are introduced and problems in the regulations are discussed. The effects on the scantlings and steel weight of the ice regulations are investigated and some effective

methods of the ice strengthening for ice floe are proposed. In addition, the comparison among ice strengthening methods is carried out in the study.



1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

심해 및 극지에서의 석유자원 시추를 위하여 드릴쉽(Drillship) 및 반잠수식 시추선(Semi-submersible Drilling Rig)의 수요가 늘어나고 있으며, 그 중에서도 극지에서의 운용(Operation)을 위한 반잠수식 시추선에 대한 관심은 더욱더 증가되고 있다. 반잠수식 시추선은 선박 형태의 드릴쉽보다 수선면적이 적어 파랑하중을 적게 받아 수직운동이 크게 줄어드는 장점이 있기에, 운동성능이 우수하여 해상조건이 가혹한 극한지에서의 연간 작업일수가 많기 때문이다.

그림 1.1은 시추설비별로 투입되는 지역을 나타내는 그림으로 반잠수식 시추선은 짙은 색으로 표시되는 해역에 많이 투입되고, 옅은 색으로 표시된 해역에는 드릴쉽이 많이 투입된다[1].



그림 1.1 시추설비의 지역별 구분

2010년도에 러시아 바렌트해(Barents Sea)의 Shtokman Field 운용을 위한 반잠수식 시추선이 건조되었지만 현재 극지에서 운용할 수 있는 부유식 시추구조물의 수는 매우 제한적이고, 보다 가혹한 조건의 극지에서 운용을 위한 반잠

수식 시추선의 수요는 증대되고 있다.

그러나, 반잠수식 시추선의 극지 운용에 따른 내빙구조 보강방법이나 그 영향에 대한 연구는 미흡한 상태이며, 빙규정(Ice Class Rule and Regulation) 적용에 따른 선각 보강물량의 증가량이나 빙하중(Ice Pressure)에 따른 구조 강도 평가, 극지 유빙에 대한 구조 보완책 등에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

이에 본 논문에서는 선박 및 해양구조물의 선급 빙규정을 토대로 극지 운용을 위한 반잠수식 시추선의 내빙구조 보강에 대한 연구를 수행하고자 한다.

1.2 논문의 구성

본 논문은 반잠수식 시추선의 극지 운용을 위한 내빙구조 보강에 대한 사항을 총 3개의 장으로 구성하여 고찰한다.

2장에서는 선박 및 해양구조물의 내빙구조 보강규정 및 선각 증가 물량을 고찰하고, 아울러 유한요소법에 의한 내빙구조 보강구조의 강도 평가를 수행한다.

3장에서는 규정에 언급되지 않은 유빙에 대한 효율적인 내빙구조 보강방법을 제안하고, 규정에 의한 내빙구조 보강 대비 어느 정도의 강도 개선 효과가 있는지 기술한다.

마지막으로 4장에서는 연구결과를 요약하여 결론을 맺는다.

2. 규정에 따른 내빙구조 보강

2.1 빙규정에 대한 고찰

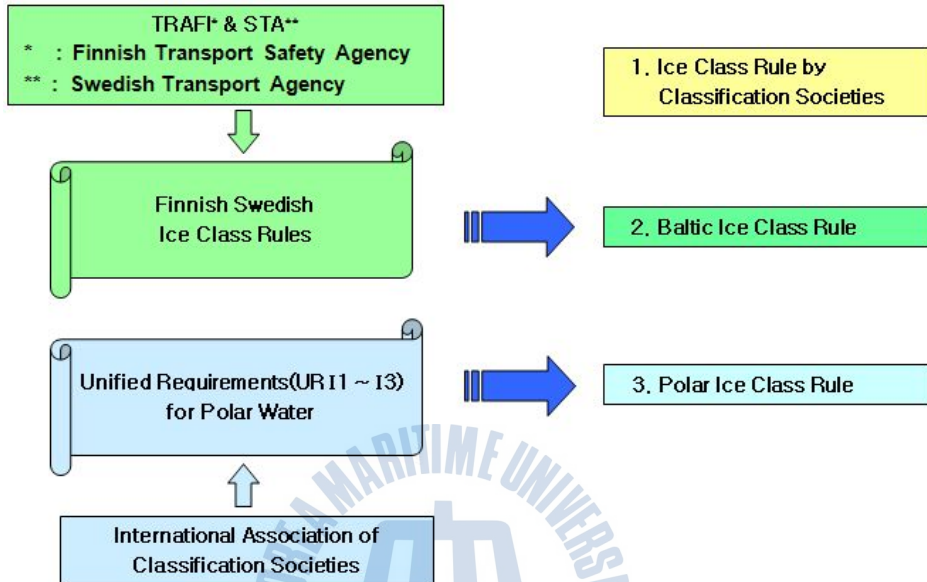


그림 2.1 선박 및 해양구조물에 적용되는 빙강도 규정

그림 2.1은 선박 및 해양구조물에 적용되는 빙규정(Ice Class Rule and Regulation)의 근거 및 발전단계를 보여주고 있다[2][3][4][5][6].

빙에 대한 선각강도 규정은 크게 선급 자체 규정, Baltic 규정 그리고 국제선급협회(IACS)의 통합규정으로 구분할 수 있다. 비슷한 해역의 빙상조건(Ice Condition)에 대하여 규정들에 따라 선각 부재치수 결정 방법이나 계산식 등에 많은 차이점이 있어서 강도 계산결과치도 서로 매우 상이하다. 따라서, 향후 빙에 대한 선각강도 규정들 간의 통합이 필요하다.

표 2.1 노르웨이선급(DNV) 해양구조물의 빙상조건에 따른 입급 표시

입급 표시(Notation)		설 명
ICE	05	Arctic ice rules, ice thickness 0.5 m, no ramming anticipated
	10	Arctic ice rules, ice thickness 1.0 m, no ramming anticipated
	15	Arctic ice rules, ice thickness 1.5 m, no ramming anticipated
	C	Basic ice strengthening
	L	Strengthened for operation in ice-infested waters
	T	Strengthened for transit in ice-infested waters
PC	1	Year-round operation in all polar waters
	2	Year-round operation in moderate multi-year ice condition
	3	Year-round operation in second-year ice which may include multi-year ice inclusions
	4	Year-round operation in thick first-year ice which may include old ice inclusions
	5	Year-round operation in medium first-year ice which may include old ice inclusions
	6	Summer/autumn operation in medium first-year ice which may include old ice inclusions
	7	Summer/autumn operation in thin first-year ice which may include old ice inclusions

표 2.1은 노르웨이선급(DNV) 해양구조물의 빙상조건에 대한 선각강도 관련 입급 표시(Notation)를 보여주고 있는데, 선박 형태가 아닌 반잠수식 시추선의 경우 ICE-L 혹은 ICE-T 입급 규정에 따라서 선각 강도를 평가한다[2].

노르웨이선급(DNV) 규정을 비롯한 현재 규정들은 선박 규정을 기반으로 제정되었기 때문에 반잠수식 시추선에 적용 시 미흡한 사항들이 있다. 이와 관련하여 향후 개선해야 할 사항들을 아래에 간략하게 정리하였다.

1) 반잠수식 시추선의 특수성

- 화물을 운송하는 선박과 석유를 시추하는 반잠수식 시추선의 운용 차이에 대한 고려
- 선박 구조와 상이한 반잠수식 시추선의 하부구조(Pontoon), 기둥(Column) 및 보강 지지 구조(Truss/Brace)에 대한 고려

2) 부재 치수 결정식의 개선

- 선박 기준의 배수량, 엔진마력, 형상계수 등의 사용에 따른 부적합성 개선
- 반잠수식 시추선의 원통형/사각형 구조와 선박의 판넬 구조의 형상 차이에 대한 고려

3) 상세 규정에 대한 설명 부족

- 노르웨이선급(DNV)의 ICE-L 혹은 ICE-T 입급 규정의 경우, Baltic 규정을 참조하여 설계하게 되어 있지만 빙등급(1C ~ 1A Super) 및 빙구역(Aft ~ Forward)을 지정하지 않았음[2][6]
- 미국선급(ABS)의 ICE CLASS A0 ~ D0 입급 규정의 경우, 선급 자체 규정에 따라서 설계하게 되어 있지만 빙등급 및 빙구역을 지정하지 않았음[5]

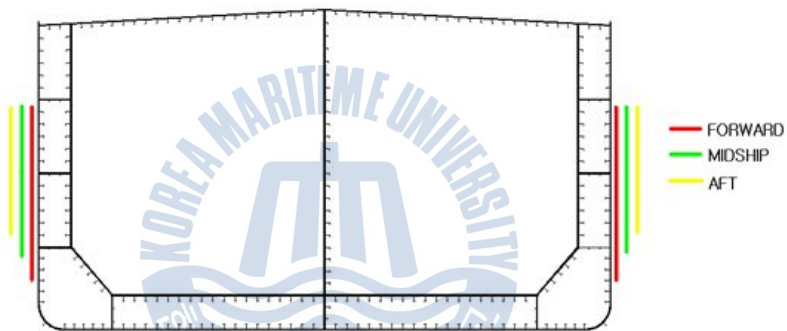
4) 극지 운용에 대한 규정 미비

- 노르웨이선급(DNV)의 경우, Baltic 규정으로만 내빙구조 보강 고려
- 다른 선급들의 경우에도 명확한 정의가 부족하며, 국제선급협회의 강도 통합규정을 기준으로 반잠수식 시추선의 적용방법에 대한 규정 제정이 필요함

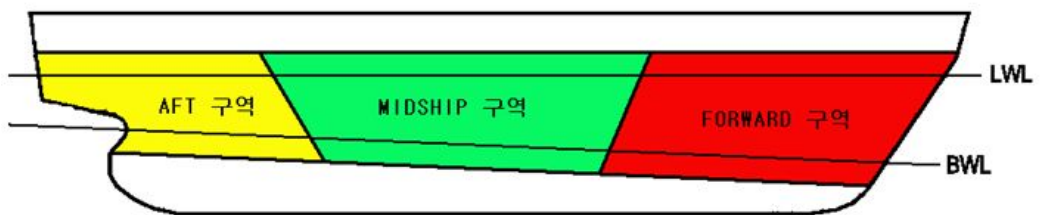
2.2 선각 보강물량

2.1절에서 언급한 선급 규정의 미흡한 점으로 인하여 현재 선급 규정으로 반잠수식 시추선의 빙등급(Ice Class)에 대한 선각 보강물량을 산정하기에는 여러 가지 불명확한 변수들이 존재하므로, 규정 적용 시 운용 해역의 정보를 바탕으로 선급 및 선주사와 많은 협의를 거쳐야 한다.

우선 선각 보강물량의 가장 큰 변수인 선박과 반잠수식 시추선의 내빙구조 보강구역(Ice Strengthening Region) 차이점에 대하여 그림 2.2와 그림 2.3에 나타내었다.

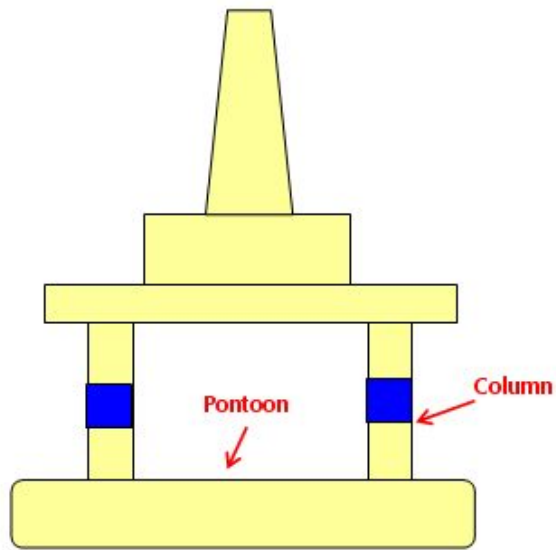


(a) 중앙횡단면도의 보강구역



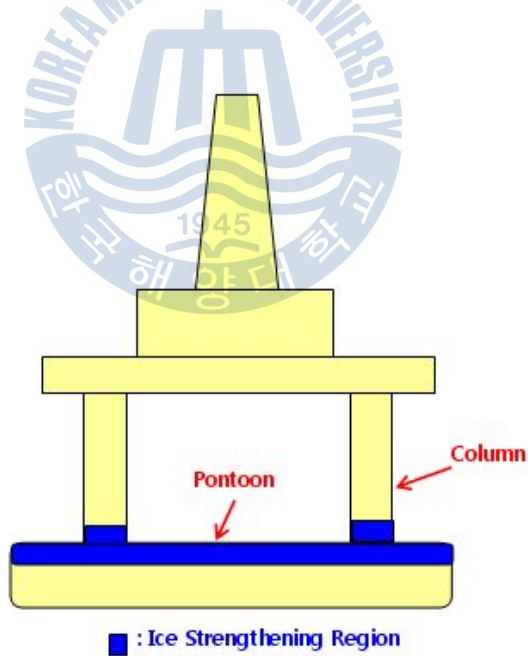
(b) 외판전개도의 보강구역

그림 2.2 선박의 내빙 보강구역



■ : Ice Strengthening Region

(a) 시추조건의 보강구역



■ : Ice Strengthening Region

(b) 이동조건의 보강구역

그림 2.3 반잠수식 시추선의 내빙 보강구역

화물을 운송하는 선박의 경우(그림 2.2 참조), 길이 방향으로 선수(Forward), 중앙부(Midship), 선미(Aft) 구역으로 나누어서 보강하며, 깊이 방향으로는 상부 만재흘수선(Loaded Water Line)과 하부 Ballast흘수선 사이를 보강한다. 일반적으로 선박이 운항할 경우, 얼음과 충돌하는 선수 구역(Forward Region)의 부재치수 증가에 따른 선각 보강이 많으며 극지 빙규정의 경우 Ballast흘수선 하부의 바닥 외판(Bottom Shell)까지 보강한다.

석유자원을 시추하는 반잠수식 시추선의 경우(그림 2.3 참조), 운용 목적에 따라 깊이 방향의 내빙구조 보강구역을 결정한다. 일반적으로 석유자원을 시추하는 시추조건(Operation Condition)과 시추지역 간을 이동하는 이동조건(Transit Condition)으로 나누어서 보강구역을 결정하는데, 운용 목적에 따라 시추조건이나, 이동조건, 혹은 두 가지 조건을 모두 만족하도록 보강구역을 결정한다.

본 절에서는 2.1절에 소개한 규정의 불명확한 부위에 대해 아래와 같은 기준으로 선각 보강물량을 산정한다.

- 1) 노르웨이선급(DNV)의 ICE-L(시추조건)과 ICE-T(이동조건) 규정 적용
- 2) Baltic 빙규정의 선수구역으로 가정하여 치수 결정
- 3) 흘수선(Draft) 기준으로 상하로 2 m 씩 보강
- 4) 이동흘수선(Transit Draft)은 하부구조(Pontoon) 상부에 위치
- 5) 6개 기둥(Column) 기준으로 외판 부위 보강
- 6) 하부구조 상부 갑판(Pontoon Upper Deck)은 보강구역에서 제외

표 2.2는 유조선과 반잠수식 시추선의 보강치수 결정을 위한 기본정보 및 빙규정에 따른 보강치수를 나타낸 것이다. 규정에 정의된 빙등급(Ice Class)에 따라 빙하중(Ice Pressure)이 결정되며, 이에 대한 선각 보강은 늑골 부재의 배치 방향 및 간격(Spacing), 길이(Span) 등에 좌우된다.

표 2.2 Baltic 내빙구조 보강을 위한 기본정보 및 보강치수

구조물 항 목			반잠수식 시추선	
			기둥 (Column)	하부구조 (Pontoon)
기본 정 보	강재 항복응력	외판 : 355 N/mm ² 내부재 : 315 N/mm ²	외판 : 355 N/mm ² 내부재 : 355 N/mm ²	
	부재 배치 방식	종능골	횡능골	종능골
	부재 간격 (Spacing)	약 550 mm	약 650 mm	약 650 mm
	부재 길이 (Span)	약 4,400 mm	약 2,100 mm	약 1,900 mm
보 강 치 수	1A Super 등급	외판 두께	약 36 mm	약 33 mm
		내부재	475x28+100x20 F.B(T)	400x20 F.B
	1A 등급	외판 두께	약 34 mm	약 31 mm
		내부재	450x26+100x20 F.B(T)	350x20 F.B
	1B 등급	외판 두께	약 32 mm	약 29 mm
		내부재	450x22+100x16 F.B(T)	300x22 F.B
	1C 등급	외판 두께	약 30 mm	약 27 mm
		내부재	450x20+100x14 F.B(T)	300x18 F.B

표 2.2의 보강치수를 적용한 선각 보강물량을 그림 2.4 ~ 그림 2.7에 나타내었다. 선각 보강물량은 간략한 표현을 위하여 전체 선각 물량 대비 증가비로 표현하고, 반잠수식 시추선의 선각 보강물량의 특징을 파악하기 위하여 선박의 동일 빙등급 적용에 따른 결과와도 비교하였다.

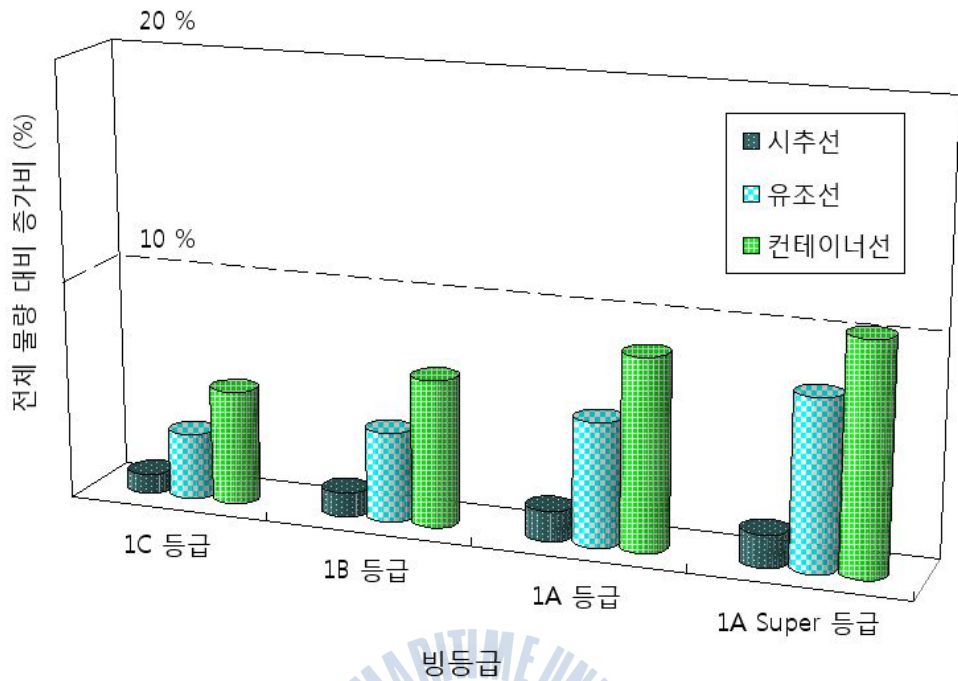


그림 2.4 반잠수식 시추선의 ICE-L 적용 시 선각 물량 증가비

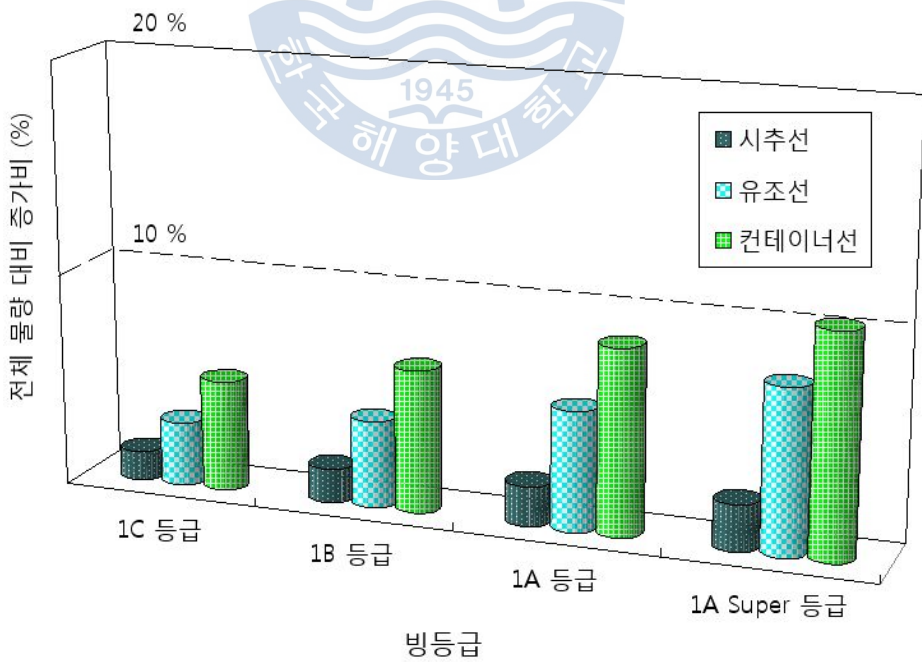


그림 2.5 반잠수식 시추선의 ICE-T 적용 시 선각 물량 증가비

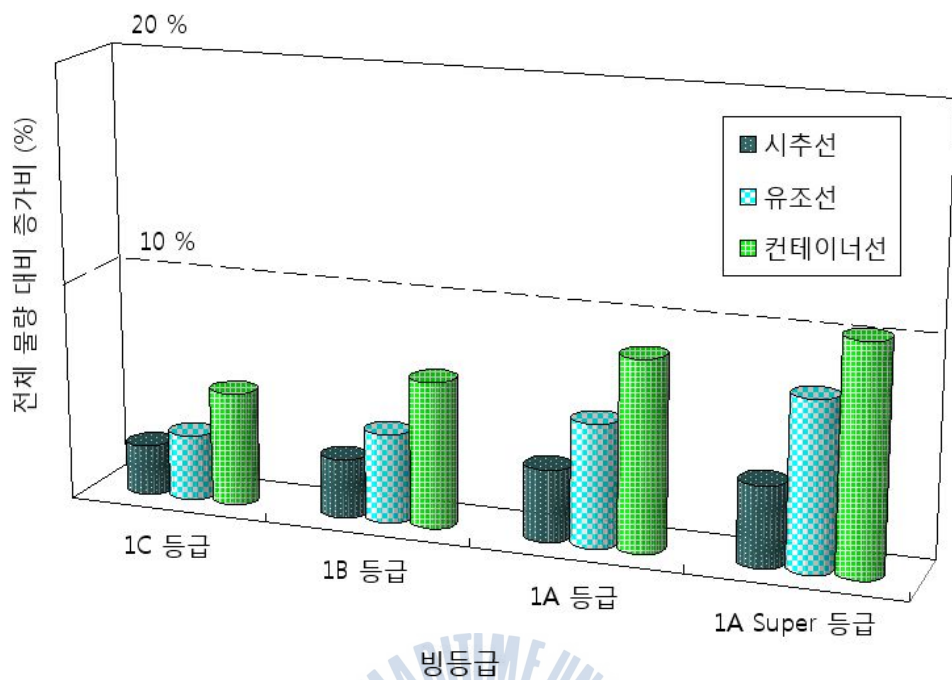


그림 2.6 반잠수식 시추선의 ICE-L과 ICE-T 적용 시 선각 물량 증가비

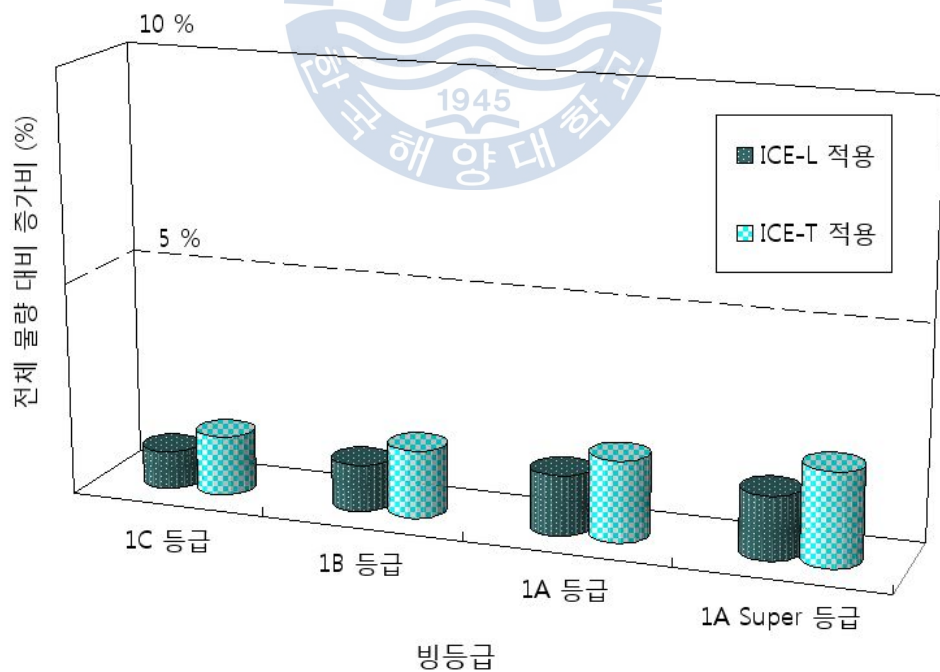


그림 2.7 반잠수식 시추선의 ICE-L 혹은 ICE-T 적용 시 선각 물량 증가비

그림 2.4과 그림 2.5는 반잠수식 시추선에 대하여 노르웨이선급(DNV)의 ICE-L(시추조건) 혹은 ICE-T(이동조건) 규정 적용에 따른 선각 보강물량을 선박과 비교하여 나타낸 것이다. 반잠수식 시추선의 선각 물량 증가비는 선박에 비해 작은 값을 가지며, 주된 이유는 반잠수식 시추선의 길이 및 높이 방향의 내빙구조 보강구역이 선박에 비하여 작기 때문이다. 또한, 기둥의 경우 선각 물량이 작게 늘어나는 횡늑골 구조이며, 기둥과 하부구조 내부재의 부재 길이(Span)가 작기 때문이다.

그림 2.6은 ICE-L(시추조건)과 ICE-T(이동조건)의 동시 적용에 따른 선각 보강물량을 선박과 비교하여 나타낸 것이다. ICE-L(시추조건)과 ICE-T(이동조건)의 보강구역은 서로 독립된 구역이기에 보강물량은 두 가지 조건의 합계와 같으며(그림 2.3 참조), 선각 물량 증가비는 그림 2.4와 그림 2.5 보다 증가하지만 유조선의 증가비 대비 50 % ~ 75 % 정도, 컨테이너선의 증가비 대비 35 % ~ 45 % 정도이다.

그림 2.7과 같이 이동조건인 ICE-T의 선각 물량 증가비가 시추조건인 ICE-L 증가비보다 큰 값을 가지며, ICE-L(시추조건)의 선각 물량 증가비는 ICE-T(이동조건)의 증가비 대비 65 % ~ 75 % 정도이다. 그 이유는 이동조건에서 흘수선(Transit Condition Draft)이 길이 방향으로 길게 놓인 하부구조(Pontoon)가 보강구역이 상대적으로 넓기 때문이다.

2.3 유한요소법에 의한 강도 평가

빙규정(Ice Class Rule and Regulation) 적용에 따른 보강치수는 간략한 수식으로 계산할 수 있지만, 규정에 따른 내빙구조 보강의 구조안전성 평가를 위하여 유한요소법(Finite Element Method)에 의한 강도 계산을 수행한다.

표 2.2에 기술된 Baltic 규정의 빙등급(Ice Class) 중에서 가장 등급이 높은 1A Super를 기준으로, 시추조건 및 이동조건에서 내빙구조 보강을 해야 하는 기둥(Column) 부위의 강도 평가를 수행하는데, 기본적인 내빙구조 보강치수는 표 2.3과 같다.

표 2.3 1A Super 적용에 따른 반잠수식 시추선 기둥의 내빙구조 보강치수

항목		보강치수
기본 정보	강재 항복응력	355 N/mm ²
	부재 배치방식	횡늑골
	부재 간격 (Spacing)	640 mm
	부재 길이/스트링거 간격 (Span)	2,100 mm
보강 치수	외판 두께	33 mm
	내부재(Stiffener)	400x20 mm Flat Bar
	Stringer 두께	30 mm

2.3.1 유한요소 모델

유한요소법에 따른 강도 평가를 수행하기 위하여, 그림 2.8와 그림 2.9의 유한요소 모델(Finite Element Model)을 사용하였고, 해석에 사용된 유한요소 모델의 요소 크기(Mesh Size)는 약 300 mm x 300 mm 이다.

기둥의 높이는 약 25 m(z축 방향),길이는 약 13 m(x축 방향), 폭은 약 17 m(y축 방향)이며, 작은 내부재(Stiffener)를 지지하는 주요 Stringer 간격은 2.1 m 이다.

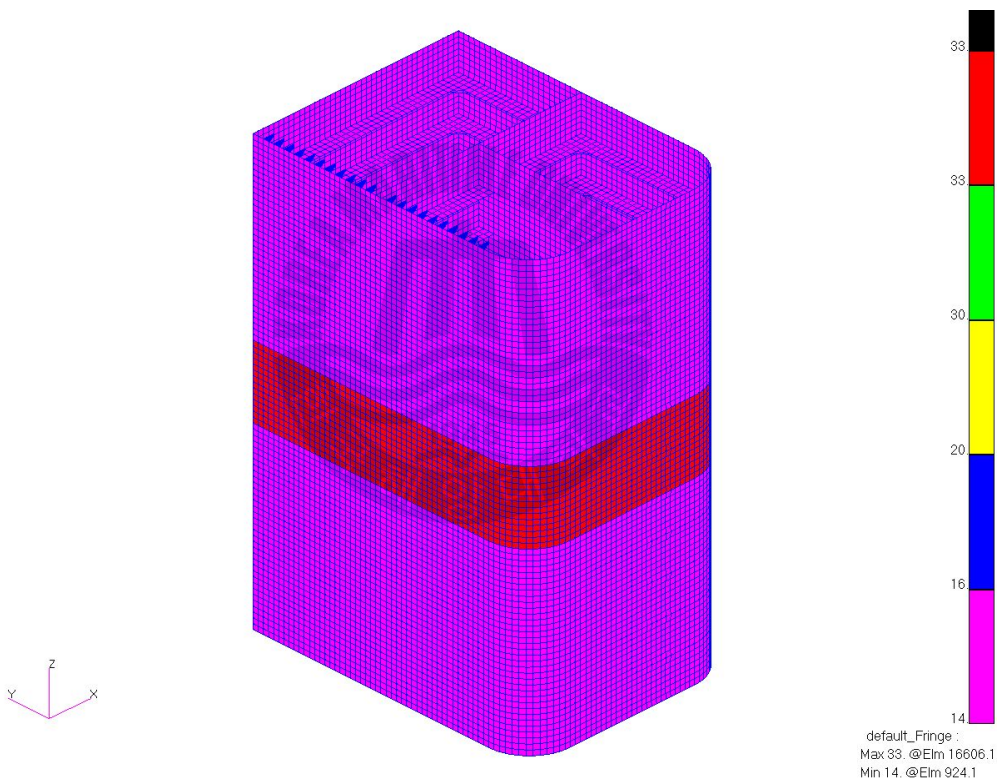


그림 2.8 기둥 전체의 유한요소 모델

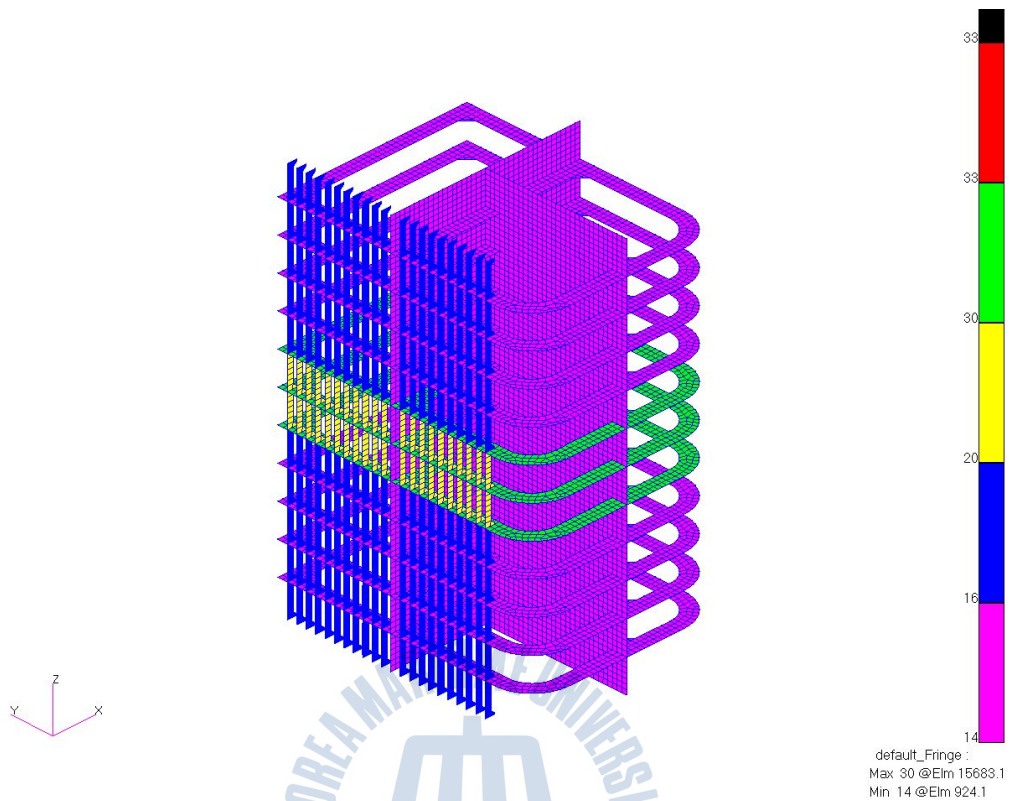


그림 2.9 기둥 내부재들의 유한요소 모델

이동흡수선 부근의 내빙구조 보강구역에는 표 2.3의 보강치수를 적용하였는데, 그림 2.8과 그림 2.9의 색깔들은 부재의 두께(단위 : mm)를 나타내었다. 대부분의 내부재(Stiffener)는 간단히 1D Beam 요소로 모델링 하였지만 빙하중 (Ice Pressure)을 받는 부위의 내부재는 정확한 강도 평가를 위하여 그림 2.9와 같이 2D Shell 요소로 모델링 하였다.

2.3.2 경계 및 하중조건

상부구조(Upper Hull)와 하부구조(Pontoon)에 의하여 지지되는 기둥(Column) 끝단의 경계조건은 그림 2.10과 같이 모든 변위와 회전을 구속하는 것으로 가정한다.

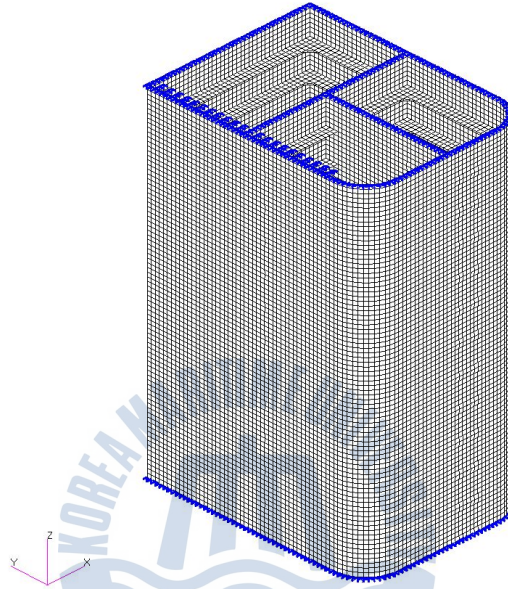


그림 2.10 기둥 유한요소 모델의 경계조건

빙등급 1A Super 적용 시의 규정 값인 $3 \text{ MPa(N/mm}^2\text{)}$ 을 빙하중으로 사용하며, 그 값은 외판과 내부재(Stiffener)에 적용되는 빙하중의 평균값이다.

빙하중에 의한 강도 평가를 수행할 경우, 하중조건을 결정하기 위하여 그림 2.11과 같이 빙하중이 작용하는 폭과 높이를 가정하여 빙하중의 접촉면적을 고려해야한다.



그림 2.11 빙하중이 작용하는 폭과 높이, 면적

그림 2.12는 여러 가지 시험결과에 따른 빙하중과 면적 간의 관계를 도시한 그림이며[7], 본 해석에서는 CSA(Canadian Standard Association) 설계 곡선을 기준으로 빙하중 접촉면적은 약 7.2 m^2 으로 가정한다.

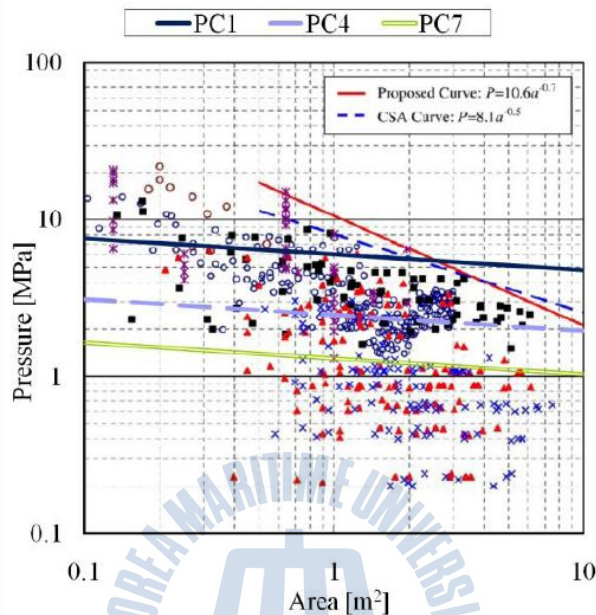


그림 2.12 빙하중과 면적간의 관계

빙하중의 크기(3 MPa)와 작용하는 면적(7.2 m^2)을 기준으로 반잠수식 시추선의 기둥에 표 2.4와 같은 4가지의 하중조건을 가정하였으며, 하중조건에 따른 빙하중 형상 및 위치를 그림 2.13 ~ 그림 2.16에 나타내었다.

표 2.4 빙하중의 형상 및 위치에 따른 하중조건

하중조건 \ 항목	빙하중의 폭	빙하중의 높이	빙하중의 크기 및 면적	빙하중의 위치
1	8 m	0.9 m	3 MPa x 7.2 m^2	Stringer 위치
2	8 m	0.9 m		Stringer 사이
3	4 m	1.8 m		Bulkhead 위치
4	4 m	1.8 m		Bulkhead와 외판 사이

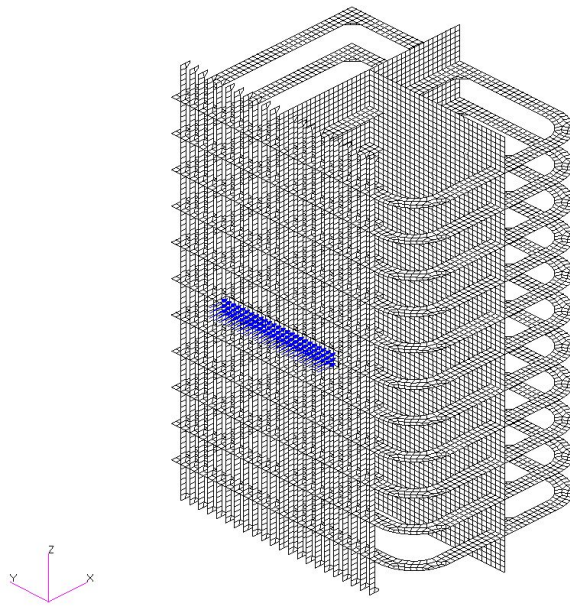


그림 2.13 하중조건 1의 빙하중 형상 및 위치

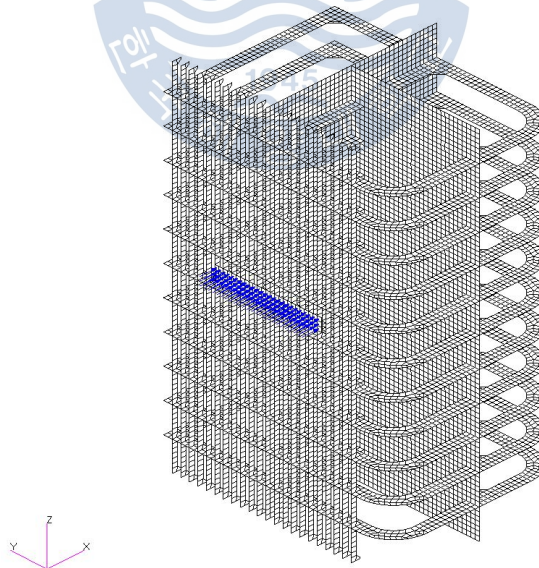


그림 2.14 하중조건 2의 빙하중 형상 및 위치

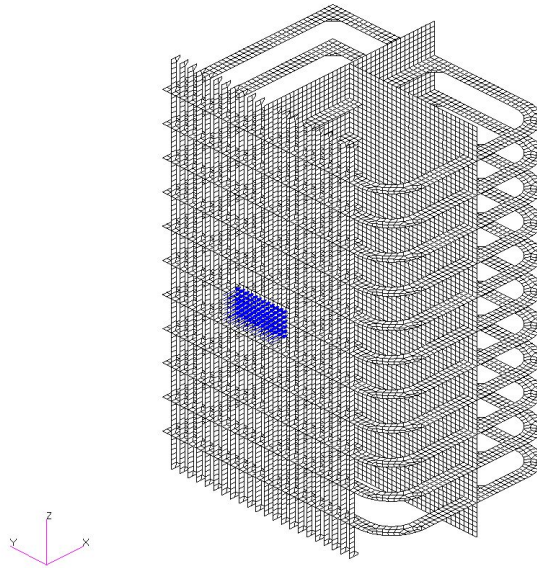


그림 2.15 하중조건 3의 빙하중 형상 및 위치

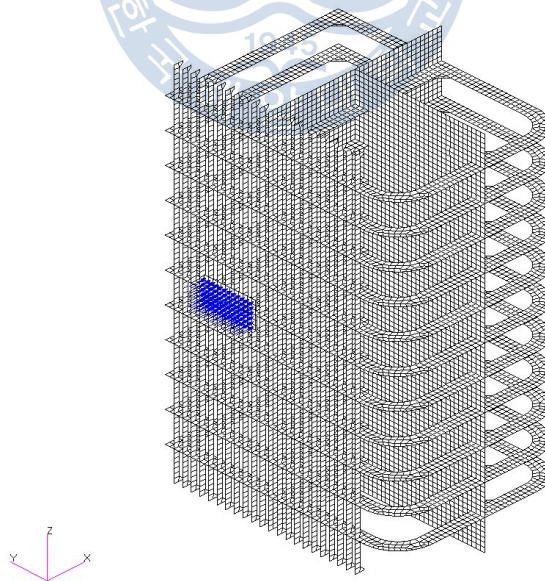
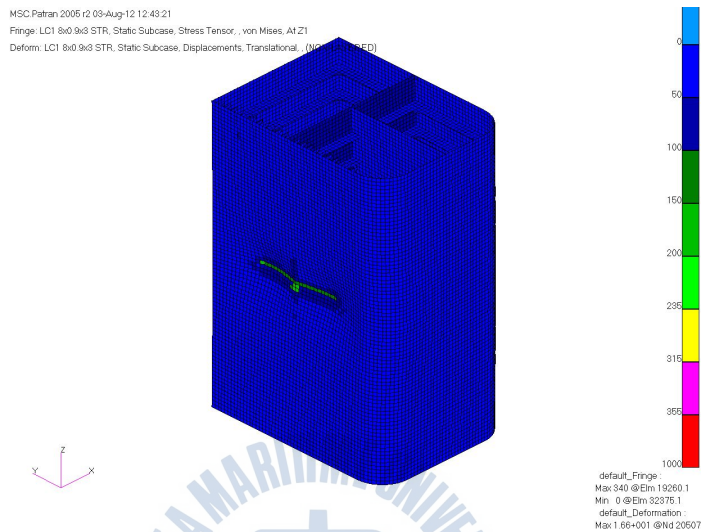


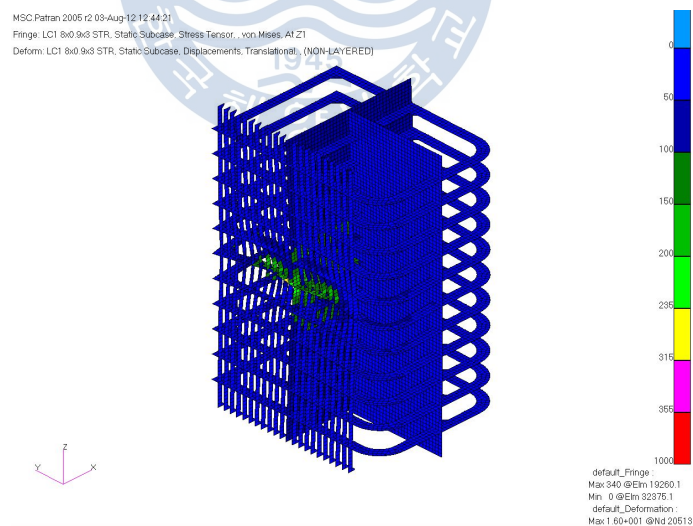
그림 2.16 하중조건 4의 빙하중 형상 및 위치

2.3.3 강도 평가결과

그림 2.17 ~ 그림 2.20은 하중조건에 따른 von-Mises Stress를 나타낸다.



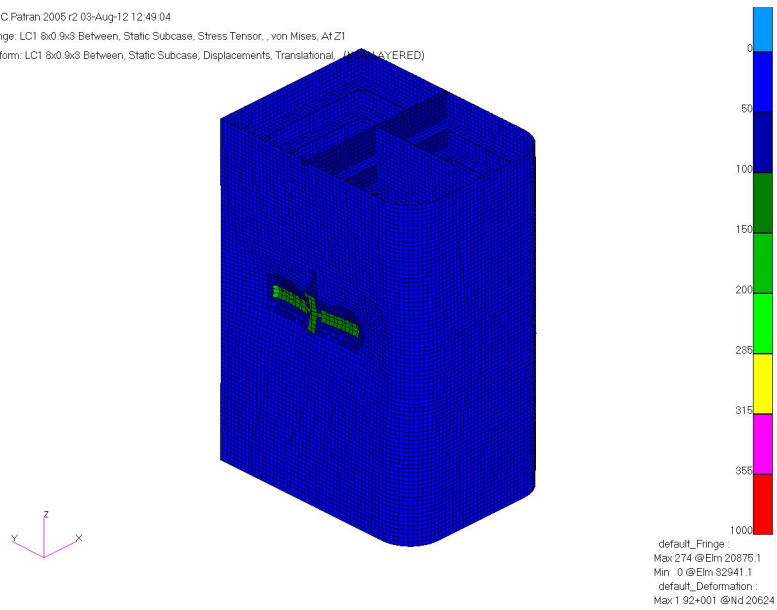
(a) 기둥 전체의 von-Mises Stress



(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

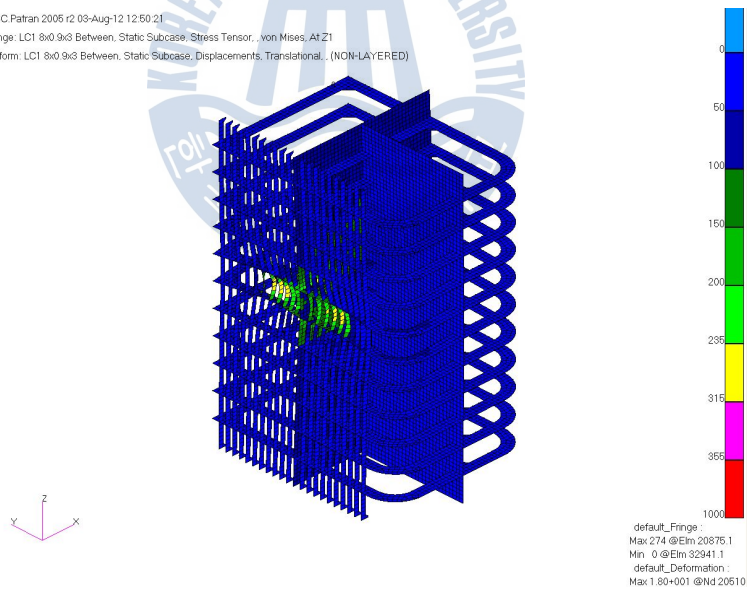
그림 2.17 하중조건 1의 von-Mises Stress

MSC Patran 2005 r2 03-Aug-12 12:49 04
 Fringe: LC1 8x0.9x3 Between, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z1
 Deform: LC1 8x0.9x3 Between, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



a) 기둥 전체의 von-Mises Stress

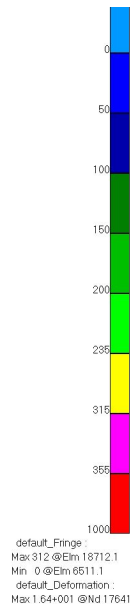
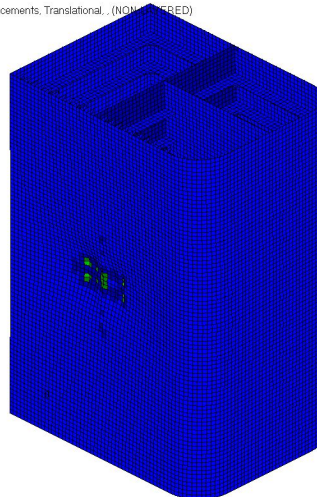
MSC Patran 2005 r2 03-Aug-12 12:50 21
 Fringe: LC1 8x0.9x3 Between, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z1
 Deform: LC1 8x0.9x3 Between, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

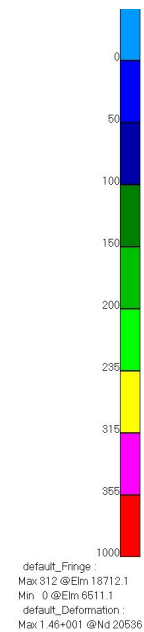
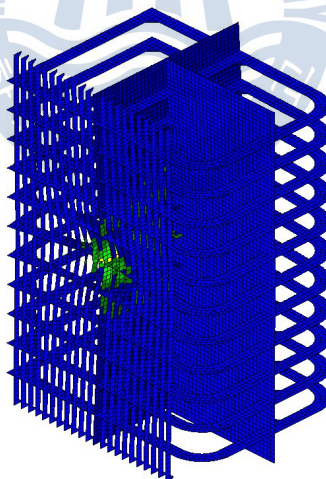
그림 2.18 하중조건 2의 von-Mises Stress

MSC.Patran 2005 r2 09-Aug-12 12:52:35
 Fringe: LC14x1 8x3 BHD, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z1
 Deform: LC14x1 8x3 BHD, Static Subcase, Displacements, Translational, ,(NON-LAYERED)



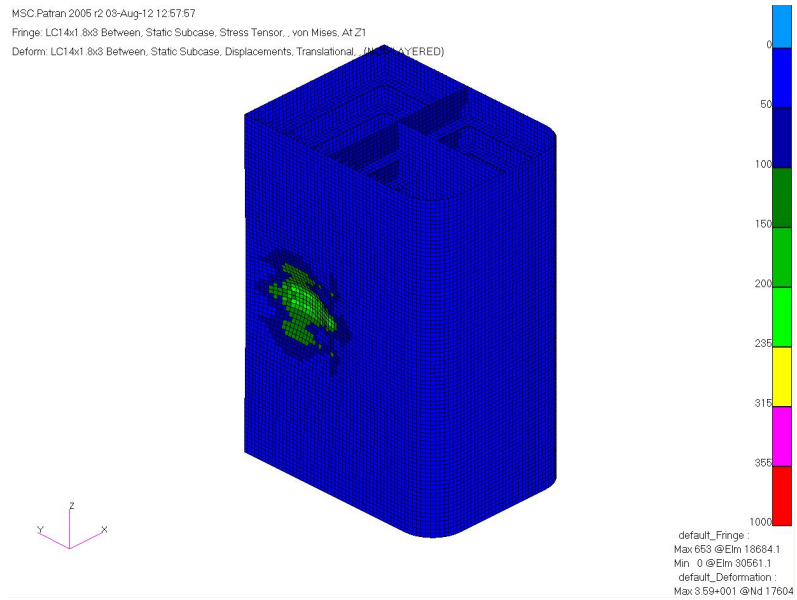
a) 기둥 전체의 von-Mises Stress

MSC.Patran 2005 r2 09-Aug-12 12:53:37
 Fringe: LC14x1 8x3 BHD, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z1
 Deform: LC14x1 8x3 BHD, Static Subcase, Displacements, Translational, ,(NON-LAYERED)

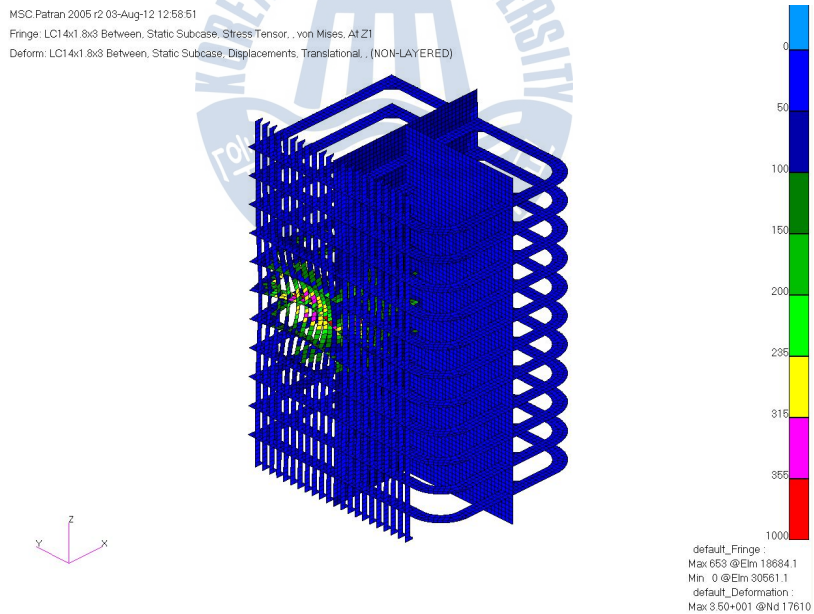


(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

그림 2.19 하중조건 3의 von-Mises Stress



a) 기둥 전체의 von-Mises Stress



(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

그림 2.20 하중조건 4의 von-Mises Stress

하중조건에 따른 기둥 구조의 부위별 최대 von-Mises Stress를 표 2.5에 정리하였다.

표 2.5 하중조건에 따른 부위별 최대 von-Mises Stress

(단위 : MPa)

구조부재 하중조건	외판	내부재 (Stiffener)	Stringer	Bulkhead
1	158	170	340	256
2	186	274	257	242
3	173	193	312	285
4	226	324	653	350

하중조건 2를 제외하고는 Stringer 및 Bulkhead 등의 주요 부재(Primary Structure Member)에 응력이 집중되며, 하중조건 2의 경우 빙하중의 폭이 길고, Stringer 사이에 하중이 위치하기에 소부재(Secondary Structure Member)인 내부재(Stiffener)의 응력 값이 다소 높다.

하중조건에 따른 부위별 최대 von-Mises Stress는 대부분 사용된 강재의 항복응력(355 MPa)의 이하 값이지만, 하중조건 4의 Stringer 같은 경우 항복응력을 초과한다.

결론적으로, 표 2.5에서 빙규정을 만족하더라도 강도상 취약한 부위들이 발생할 수 있다는 점과 빙하중의 적용위치에 따른 결과가 매우 다르다는 점을 알 수 있다. 따라서, 빙규정에 따른 반잠수식 시추선의 구조설계 시, 빙하중에 따른 직접 강도 평가로 규정의 미흡한 부분에 대한 검토 및 보완이 필요하다.

3. 유빙에 대한 선각 보장

3.1 보강방법 고찰

선박 및 해양구조물을 극지에서 운용할 경우 유빙(Ice Floe)을 회피하여 운용하거나 쇄빙선을 이용하여 유빙을 제거하지만, 고정된 시추지역에 운용하는 반잠수식 시추선의 특징상 극지에서 안정적인 운용을 위해서는 불가피한 유빙과의 충돌에 의한 선각의 손상 방지책이 필요하다.

그러나, 실제 충돌확률이 낮은 중대형 유빙까지 고려한 내빙구조 보강을 할 경우, 과도한 선각 물량 및 부재치수 등의 증가로 자재비 및 건조비 등이 증가한다. 이에 그림 3.1과 같이 반잠수식 시추선이 시추조건에서 운용되는 경우, 유빙 충돌에 대한 효과적인 선각 보강방법을 제안한다.

보강방법은 크게 Tension Wire에 의한 방법(3.2절), Ring Clamp에 의한 방법(3.3절), 그리고 Ice Knife(3.4절)에 의한 방법으로 나누어서 제안하며, 보강방법에 대한 강도 평가를 수행하여 규정에 의한 내빙구조 보강에 대해 어느 정도의 강도 개선효과가 있는지 기술한다(3.5절).

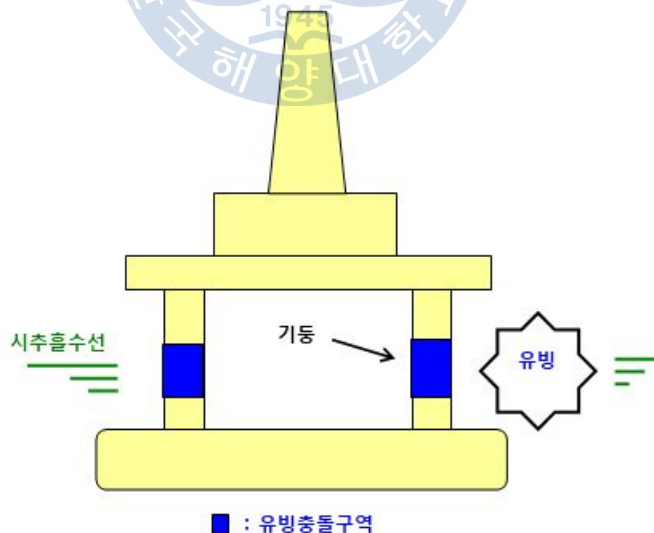


그림 3.1 반잠수식 시추선의 유빙 충돌구역

3.2 Tension Wire 구조

유빙의 충돌 가능성이 있는 반잠수식 시추선의 기둥(Column) 구조는 선박의 선수부에 비하여 매우 단순한 원통 혹은 사각형 형상이다. 이런 단순한 형상의 특징을 이용하여 그림 3.2와 같은 Tension Wire 구조 설치가 가능하다.

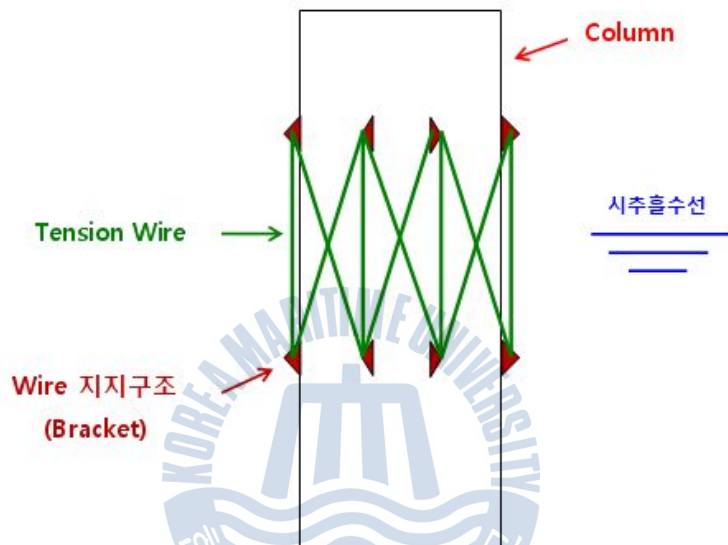


그림 3.2 반잠수식 시추선의 Tension Wire 구조

유빙과 충돌을 할 경우, Tension Wire 구조는 자체 탄성으로 유빙을 튕겨내는 효과를 발휘할 수 있고, 시추선의 운용 목적이나 지역에 따라서 Tension Wire를 설치 혹은 제거할 수 있다. 또한 Tension Wire 설치에 따른 접수면적(Wet Surface)의 변동이 없기에 운동성능에 영향을 주지 않는 장점이 있다.

Tension Wire의 경우, 해양계류용(Offshore Mooring)으로 사용되는 Steel Wire Rope나 Fibre Rope로 이용이 가능하며, Steel Wire의 종류는 그림 3.3과 같다[2].

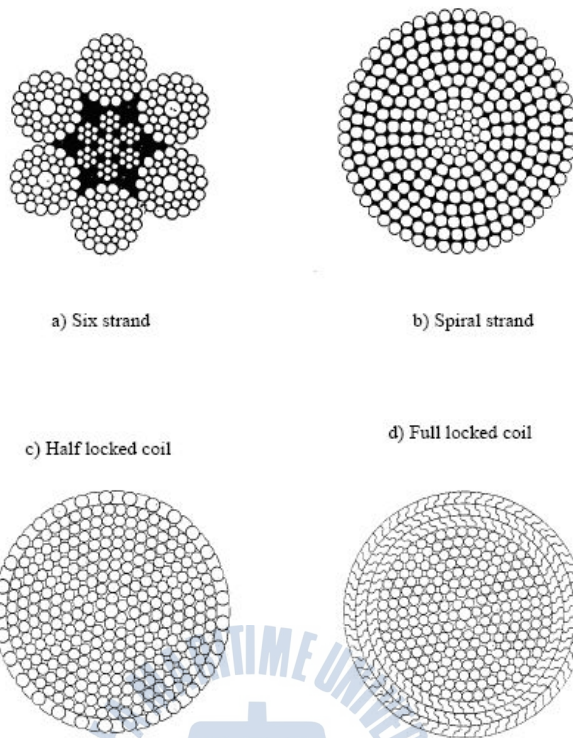


그림 3.3 해양계류용 Steel Wire 종류

Steel Wire의 경우, 종류별 지름에 따른 절단강도(Braking Force)가 약 300 MPa ~ 2,000 MPa로 매우 다양하기에[2], 운용하는 해역의 유빙 정보에 따른 빙하중을 산정하여, Steel Wire를 폭넓게 선택할 수 있다.

3.3 Ring Clamp 구조

반잠수식 시추선의 기둥(Column) 구조의 특징을 이용하여, 그림 3.4와 같은 Ring Clamp 형태의 탈부착식 보강구조 및 Ice Knife 구조 설치가 가능하다.

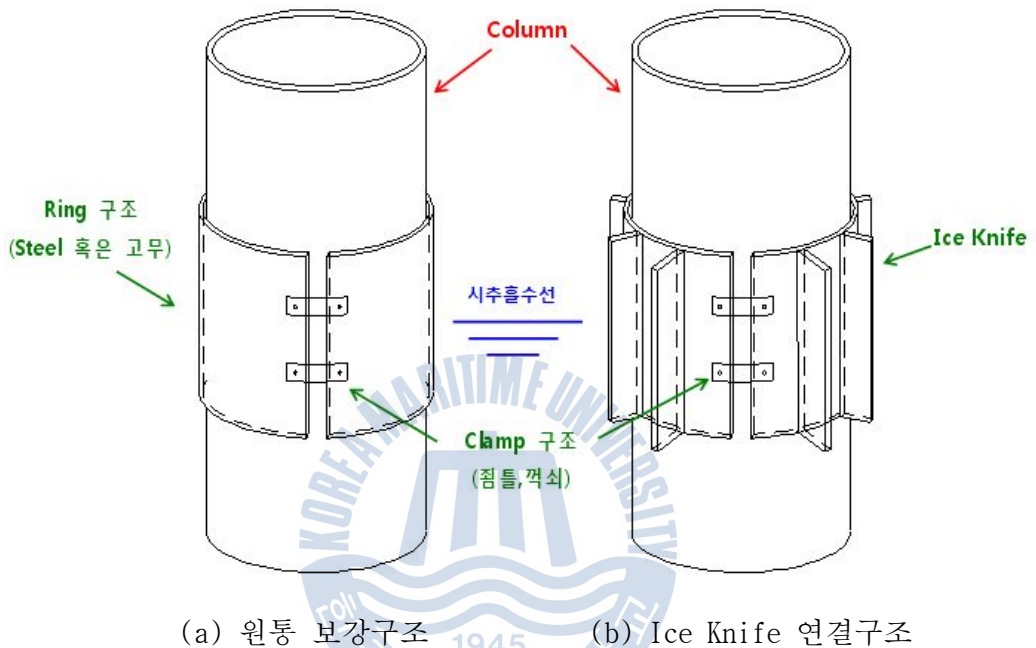


그림 3.4 반잠수식 시추선의 Ring Clamp 구조

그림 3.4의 Ring 구조의 경우 운용하는 해역의 빙하중 정보에 따라서 Steel 혹은 고무 재질로 제작이 가능하며, Clamp 구조는 점틀, 꺾쇠 등의 다양한 탈부착식 연결구조로도 제작이 가능하다. 또한, 탈부착식으로 고려하지 않을 경우에는 기둥에 직접 용접구조로 연결하여 제작할 수 있다.

Ring Clamp 구조의 가장 큰 장점은 내빙구조 보강을 하지 않고 건조된 반잠수식 시추선이 극지에서 운용될 경우, 추가적으로 설치가 용이하다는 점이다.

3.4 Ice Knife 구조

Baltic 규정의 빙등급 1A 이상에서는 선미부 Rudder 보호를 위한 Ice Knife 설치를 요구하고 있으며[6], 선박의 경우 큰 유빙 충돌에 대한 대비책으로 그림 3.5와 같이 선수부 운항흘수선 부근에 Ice Knife를 설치할 수 있다.

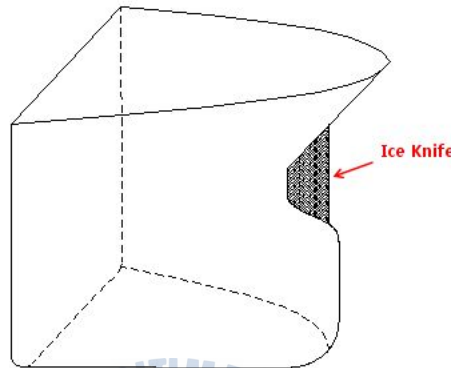
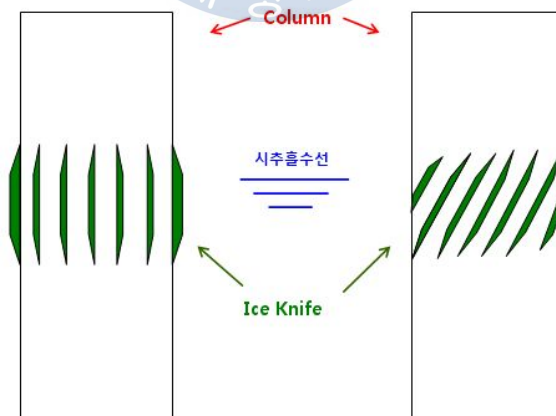


그림 3.5 선박의 선수부 Ice Knife

반잠수식 시추선의 경우, 선박과 형상이 다르지만 그림 3.6과 같은 개념의 Ice Knife 구조를 기둥(Column)에 설치할 수 있다.



(a) 수직 방향

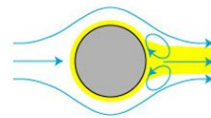
(b) 사선 방향

그림 3.6 반잠수식 시추선의 Ice Knife 구조

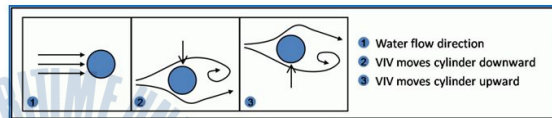
Ice Knife의 크기에 따라서 기둥에 부착 방향을 고려해야 하며, Ice Knife의 크기가 클 경우, 그림 3.7의 와류유기진동(Vortex Induced Vibration)을 저감하기 위한 나선형 판(Strake) 형상과 비슷하게 사선 혹은 나선방향으로 설치해야 한다.



Strake



(b) 와류형상



(c) 와류유기진동(VIV) 개념

(a) 나선형 판(Strake) 형상

그림 3.7 Spar 해양구조물의 와류유기진동 저감 구조

또한 Ice Knife 구조는 운용 목적에 따라서 그림 3.8과 같은 탈부착식 연결구조로 제작할 수도 있다.

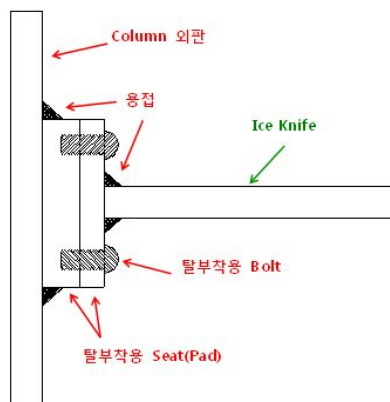


그림 3.8 탈부착식 Ice Knife 구조

3.5 강도 개선효과 고찰

3.2절 ~ 3.4절에서 제안한 유빙에 대한 선각 보강방법의 강도 개선효과를 파악하기 위하여, 유한요소법에 의한 강도 평가를 수행한다.

Tension Wire 형상 및 설치 간격, Ice Knife 형상에 따른 강도 평가 결과들을 비교하여 개선효과를 고찰한다.

3.5.1 Tension Wire 구조

3.5.1.1 강도 평가방법

2.3절의 유한요소법에 의한 강도 평가절차에 따라서 Tension Wire 구조 설치에 따른 강도 계산을 수행하며, 최대 von-Mises Stress가 도출된 하중조건 4의 빙하중을 Tension Wire 구조에 적용하여 계산한다.

하중조건 4에 적용된 빙하중의 크기는 3 MPa 이며, 빙하중이 작용하는 폭과 높이는 4 m x 1.8 m 이다(그림 2.11 및 표 2.4 참조).

강도 평가에 고려된 Tension Wire 구조의 형상 및 치수는 표 3.1 및 그림 3.9 ~ 그림 3.11과 같다.

표 3.1 Tension Wire 구조의 강도 평가 계산예

항목 Case	Tension Wire 형상	Tension Wire 간격 (Spacing)	빙하중
Original	No Tension Wire	-	Pressure : 3 MPa x 7.2 m ²
1	반지름 25 mm의 원형 Steel Bar	640 mm (격자구조)	Nodal Forces : 166 kN x 130 Nodes
2	반지름 50 mm의 원형 Steel Bar		
3	반지름 75 mm의 원형 Steel Bar	640 mm	Nodal Forces : 441 kN x 49 Nodes

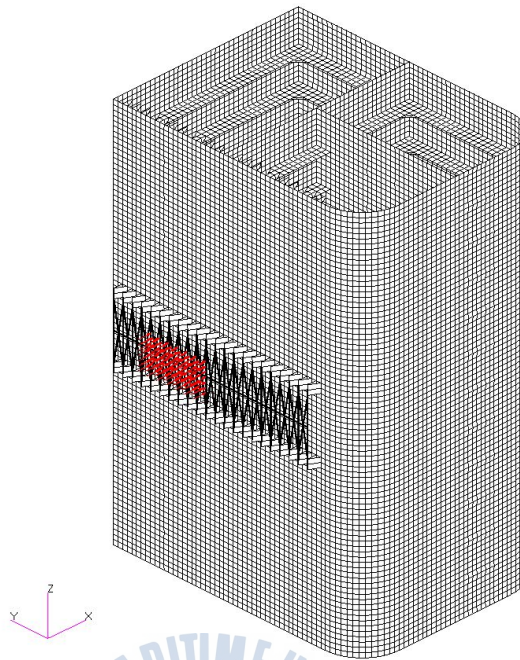


그림 3.9 Case 1의 Tension Wire 형상

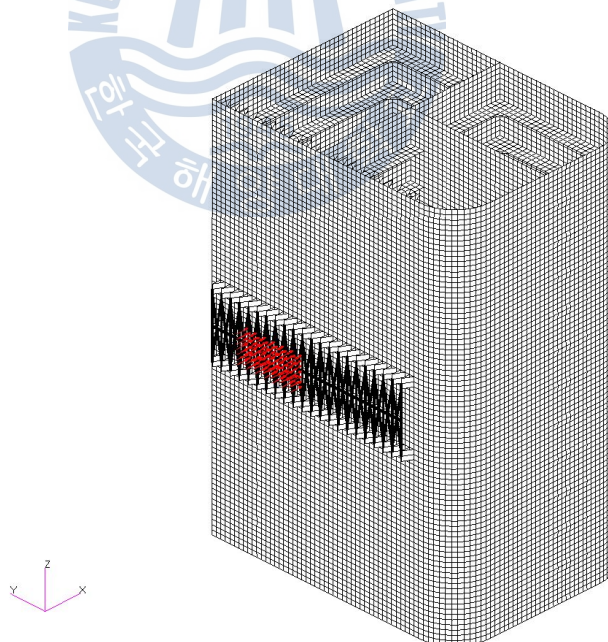


그림 3.10 Case 2의 Tension Wire 형상

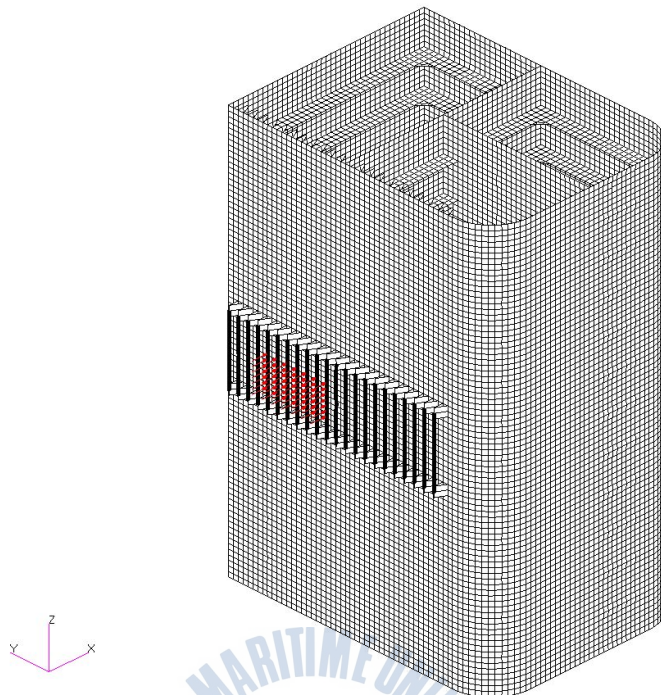
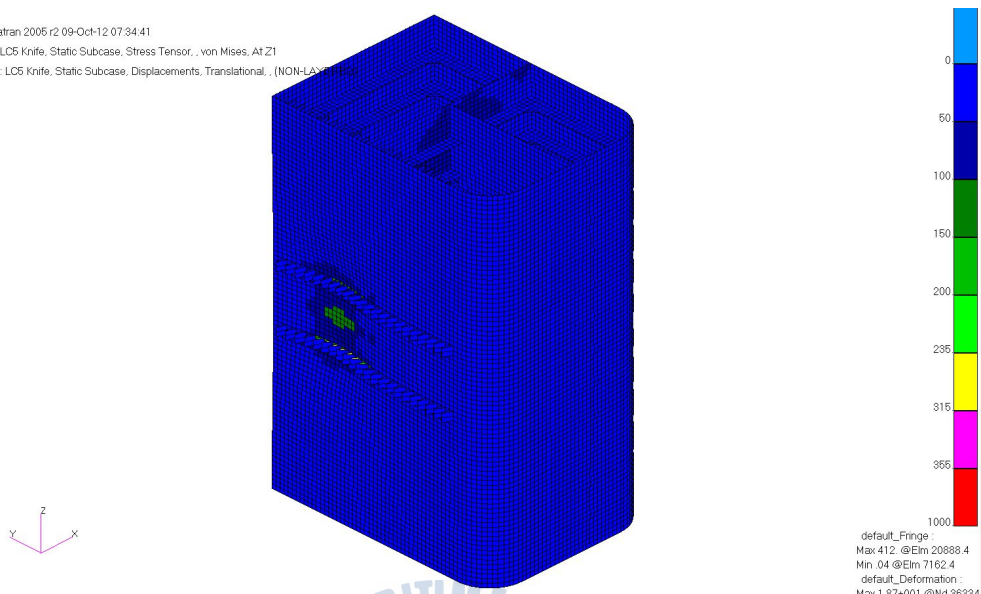


그림 3.11 Case 3의 Tension Wire 형상

3.5.1.2 강도 평가결과

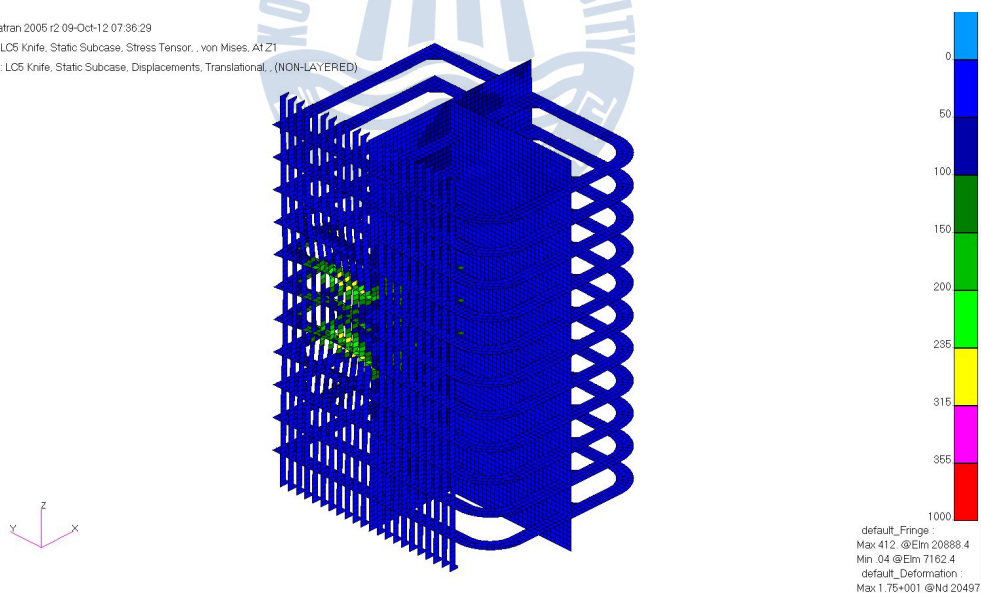
그림 3.12 ~ 그림 3.14은 Tension Wire 형상에 따른 사례별 von-Mises Stress를 나타낸다.

MSC.Patran 2005 r2 09-Oct-12 07:34:41
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



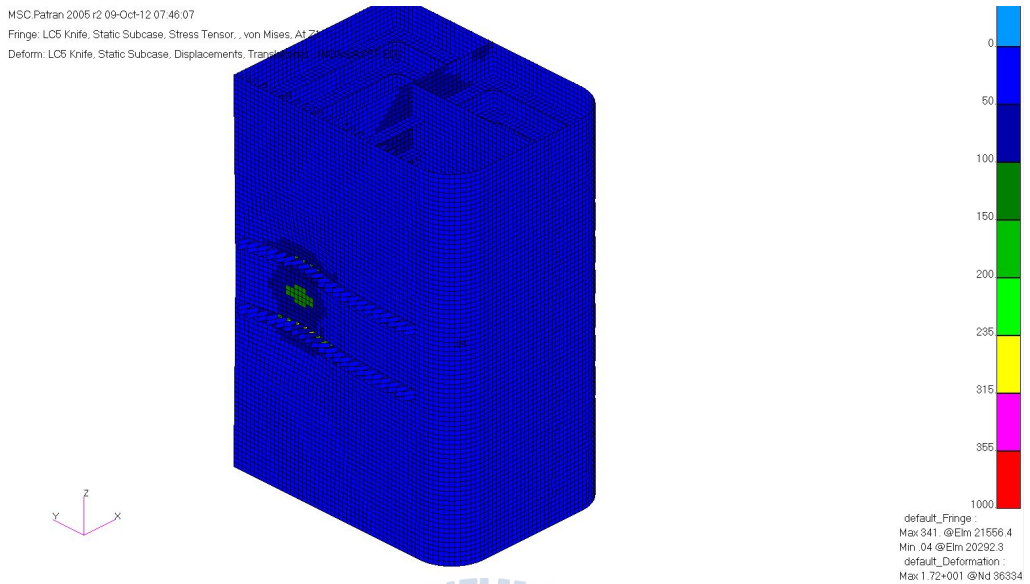
(a) 기둥 전체의 von-Mises Stress

MSC.Patran 2005 r2 09-Oct-12 07:36:29
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

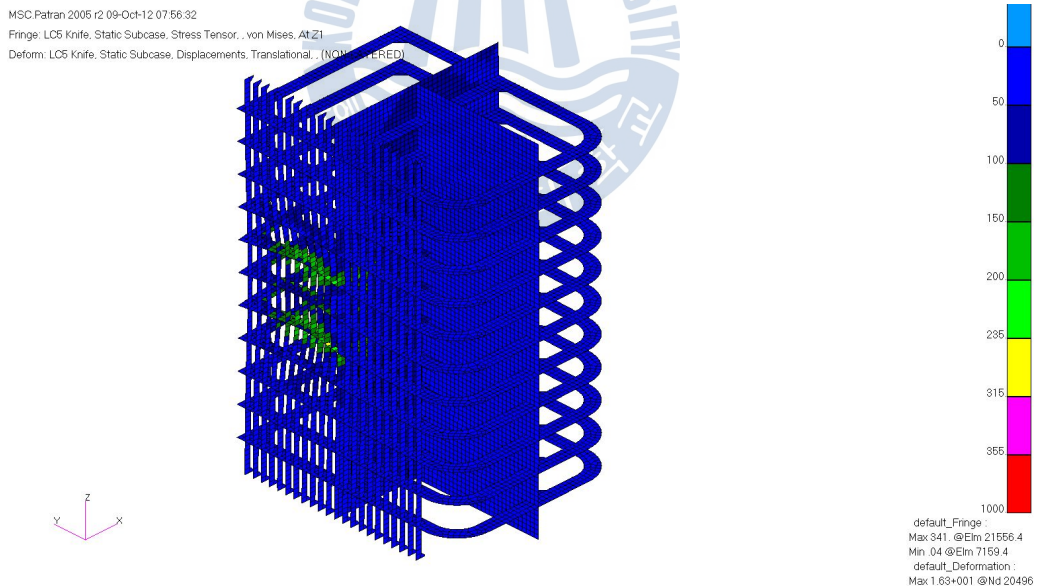


(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

그림 3.12 Tension Wire Case 1의 von-Mises Stress



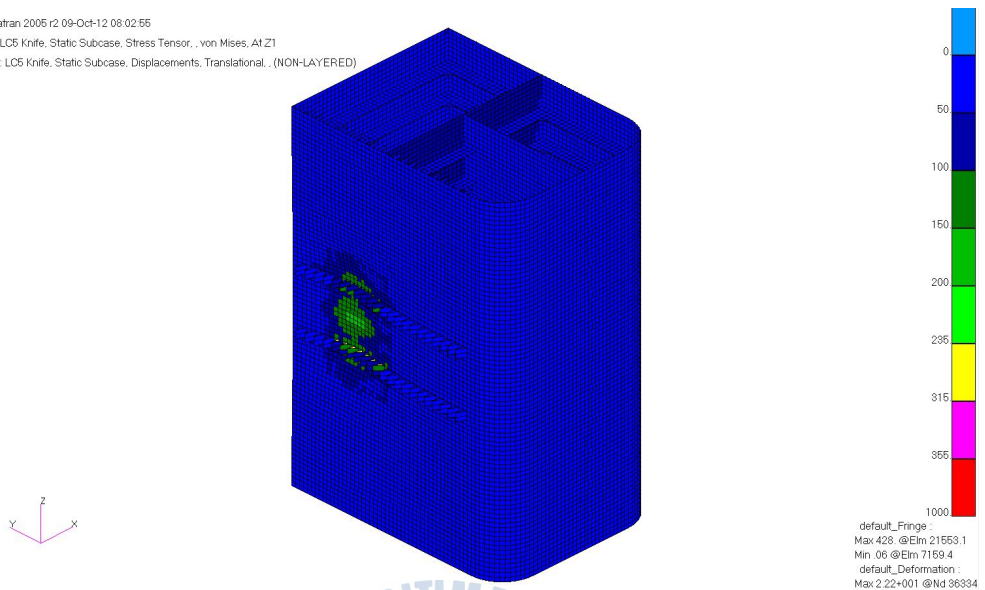
(a) 기둥 전체의 von-Mises Stress



(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

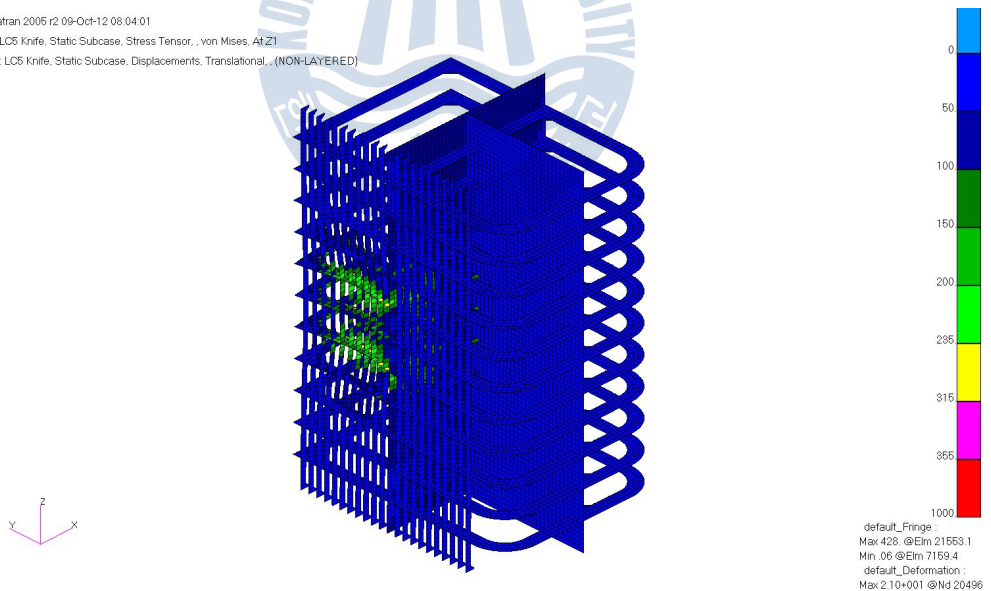
그림 3.13 Tension Wire Case 2의 von-Mises Stress

MSC.Patran 2005 r2 09-Oct-12 08:02:55
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



(a) 기둥 전체의 von-Mises Stress

MSC.Patran 2005 r2 09-Oct-12 08:04:01
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

그림 3.14 Tension Wire Case 3의 von-Mises Stress

Tension Wire 형상에 따른 기둥 구조의 부위별 최대 von-Mises Stress를 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 Tension Wire 형상에 따른 최대 von-Mises Stress

(단위 : MPa)

구조부재		외관	내부재 (Stiffener)	Stringer	Bulkhead	Tension Wire (Axial Stress)
Case						
Original	No Tension Wire	226	324	653	350	-
1	반지름 25 mm Steel Bar (격자구조)	149 (66 %)	412 (127 %)	353 (54 %)	233 (67 %)	-361
2	반지름 50 mm Steel Bar (격자구조)	142 (63 %)	287 (89 %)	341 (52 %)	227 (65 %)	-136
3	반지름 75 mm Steel Wire	172 (76 %)	385 (119 %)	428 (66 %)	290 (83 %)	-125

(%) : Original 대비 증감 비율

부위별 최대 von-Mises Stress 감소폭은 Tension Wire 형상에 따라서 편차가 있지만, Tension Wire를 설치하는 경우 30 % ~ 50 % 정도의 Stress 감소 효과가 있다.

Case 1과 Case 3의 내부재(Stiffener)는 Original 대비 Stress가 증가하지만, Tension Wire 끝단의 지지 Bracket 설치에 따른 현상이기에 국부적인 보강으로 Stress 감소가 가능하다.

3.5.2 Ice Knife 구조

3.5.2.1 강도 평가방법

2.3절의 유한요소법에 의한 강도 평가절차에 따라서 Ice Knife 구조 설치에 따른 강도 계산을 수행하며, 최대 von-Mises Stress가 도출된 하중조건 4의 빙하중을 Ice Knife 구조에 적용하여 결과를 도출한다.

하중조건 4에 적용된 빙하중의 크기는 3 MPa 이며, 빙하중의 폭과 높이는 4 m x 1.8 m 이다(그림 2.11 및 표 2.4 참조).

강도 평가에 고려된 Ice Knife의 형상 및 치수는 표 3.3 및 그림 3.15 ~ 그림 3.17과 같다.

표 3.3 Ice Knife 구조의 강도 평가 계산예

항목 Case	Ice Knife 형상	Ice Knife 간격 (Spacing)	빙하중
Original	No Ice Knife	-	Pressure : 3 MPa x 7.2 m ²
1	400x40 mm Flat Bar	640 mm	Nodal Forces : 441 kN x 49 Nodes
2	400x40 mm 삼각형 구조		
3	600x60 mm Flat Bar		

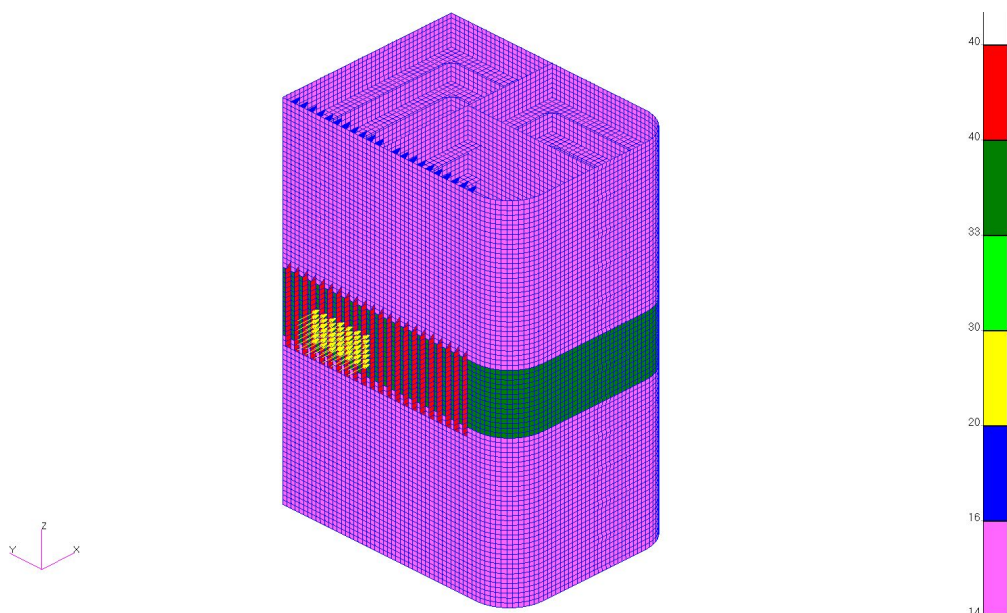


그림 3.15 Case 1의 Ice Knife 형상

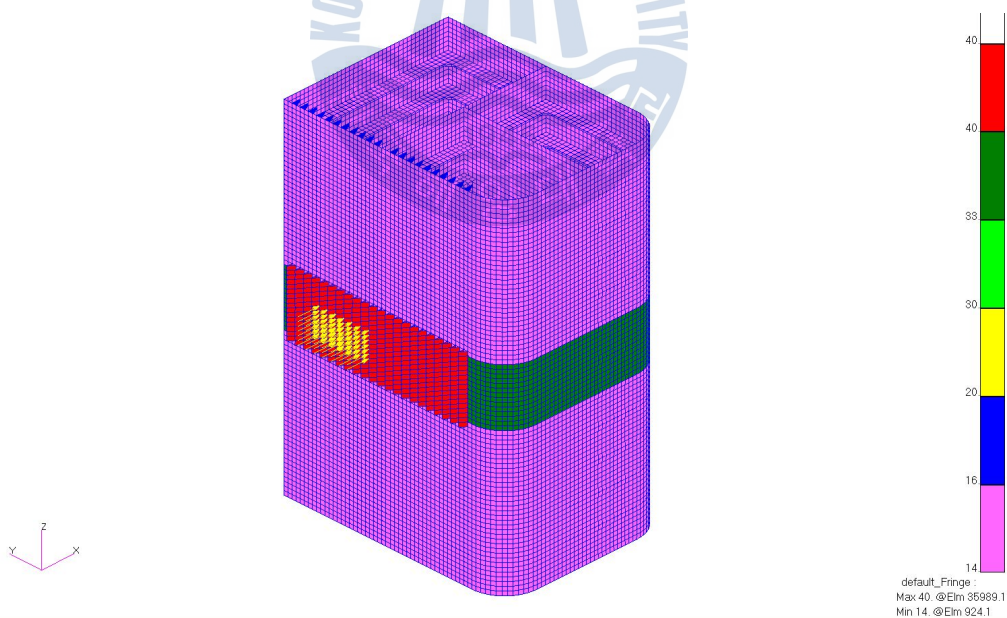


그림 3.16 Case 2의 Ice Knife 형상

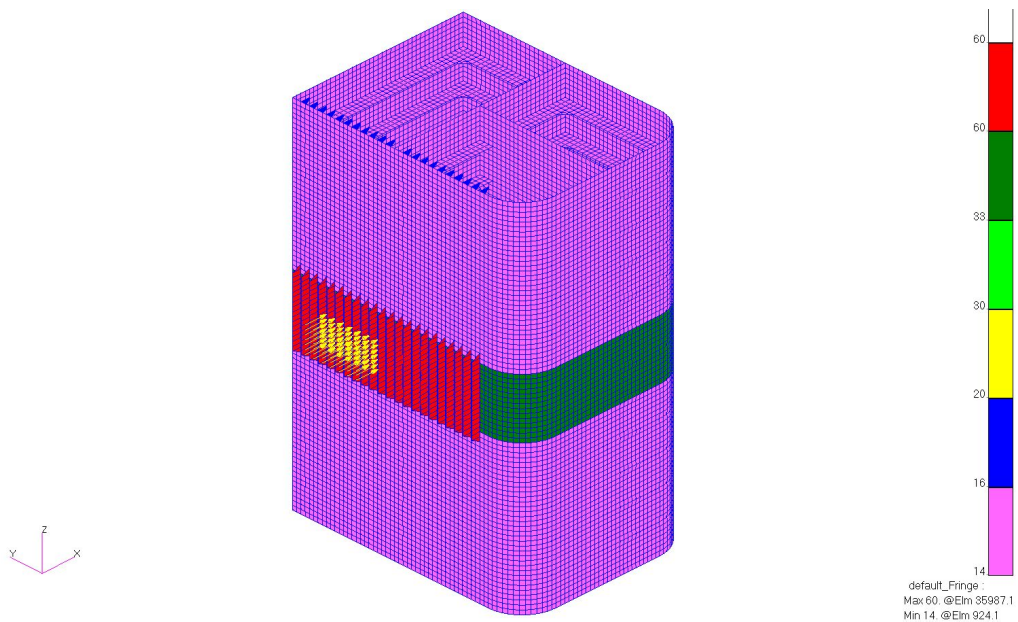
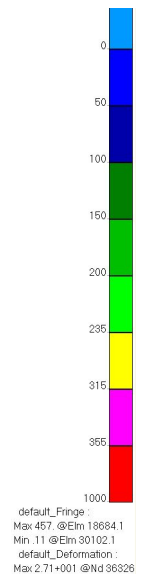
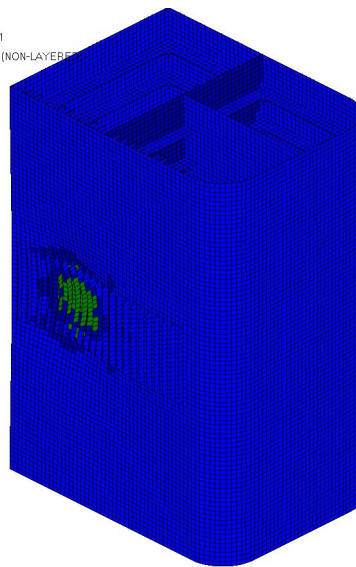


그림 3.17 Case 3의 Ice Knife 형상

3.5.2.2 강도 평가결과

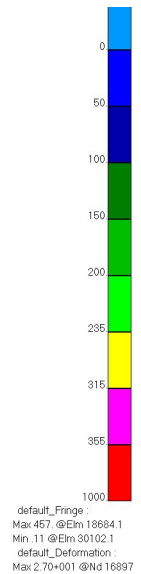
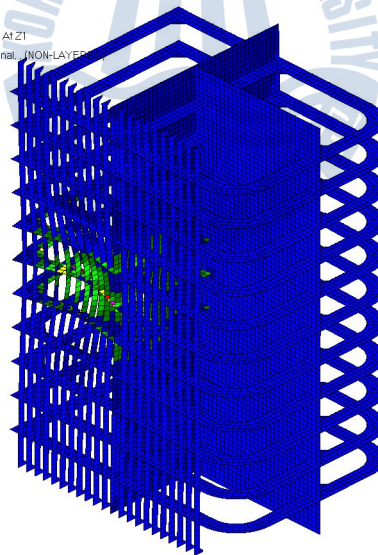
그림 3.18 ~ 그림 3.20은 Ice Knife 형상에 따른 von-Mises Stress를 나타낸다.

MSC Patran 2005 r2 07-Oct-12 08:52:12
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



a) 기둥 전체의 von-Mises Stress

MSC Patran 2005 r2 07-Oct-12 08:53:48
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



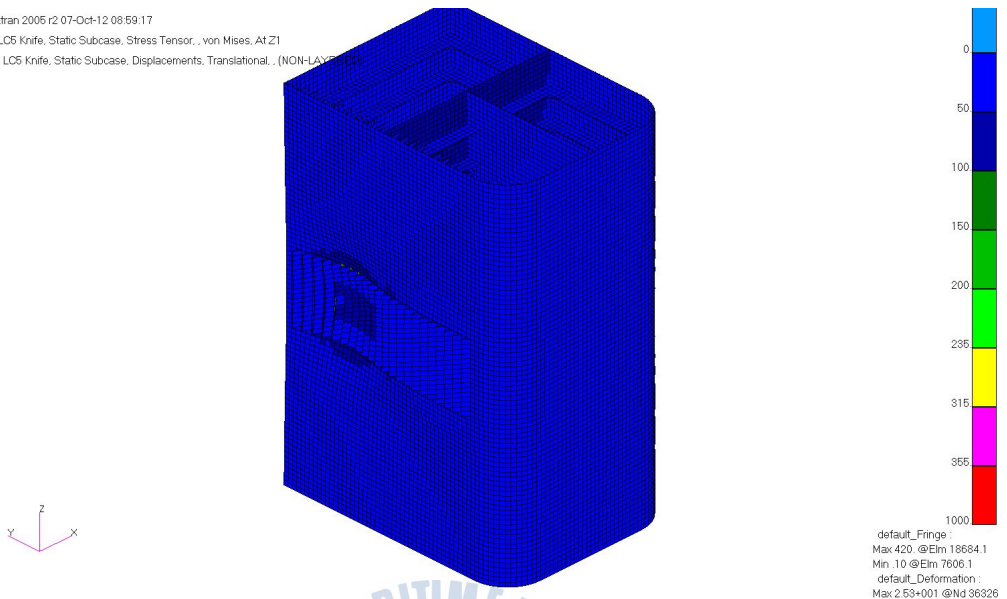
(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

그림 3.18 Ice Knife Case 1의 von-Mises Stress

MSC.Patran 2005 r2 07-Oct-12 08:59:17

Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1

Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

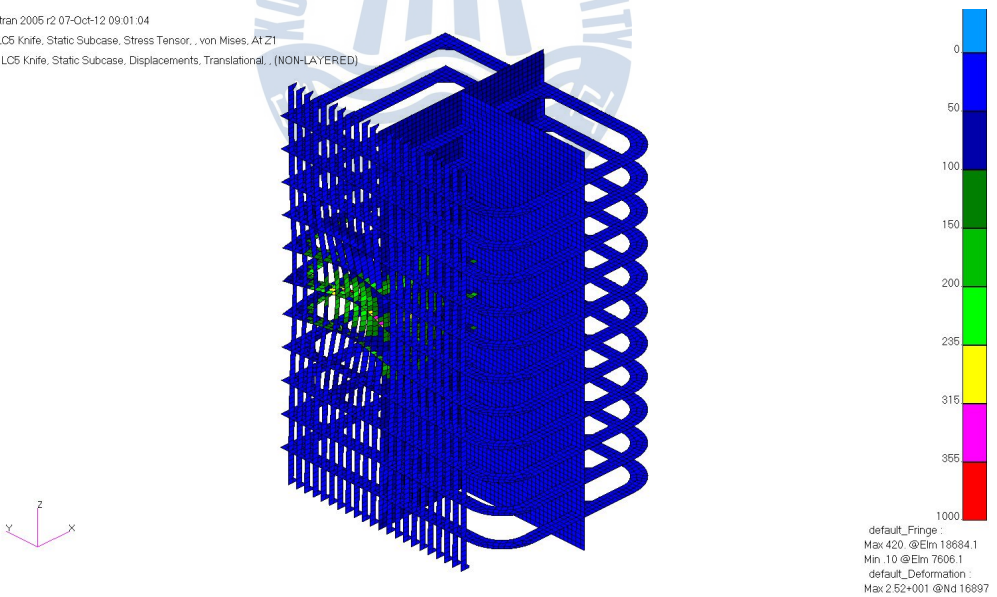


(a) 기둥 전체의 von-Mises Stress

MSC.Patran 2005 r2 07-Oct-12 09:01:04

Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, At Z1

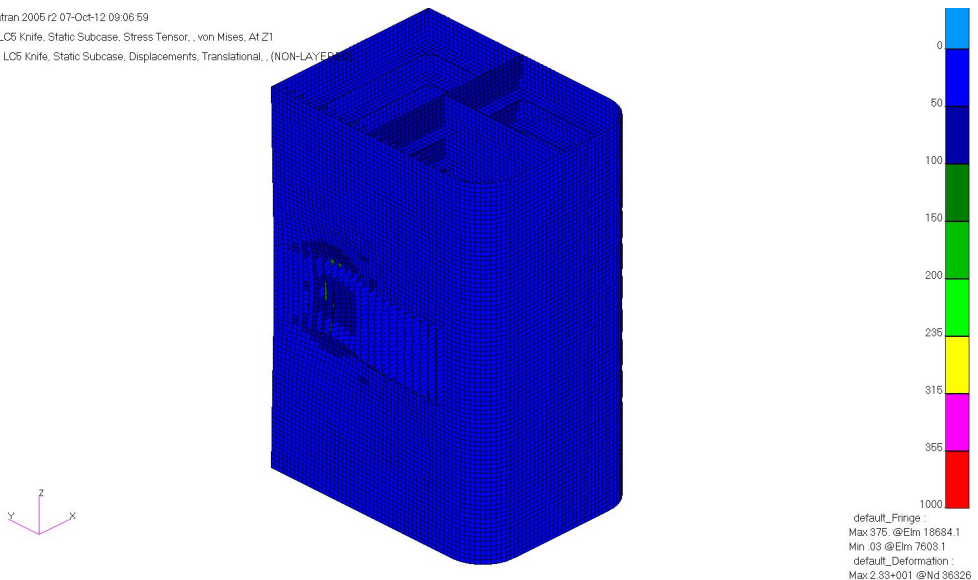
Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

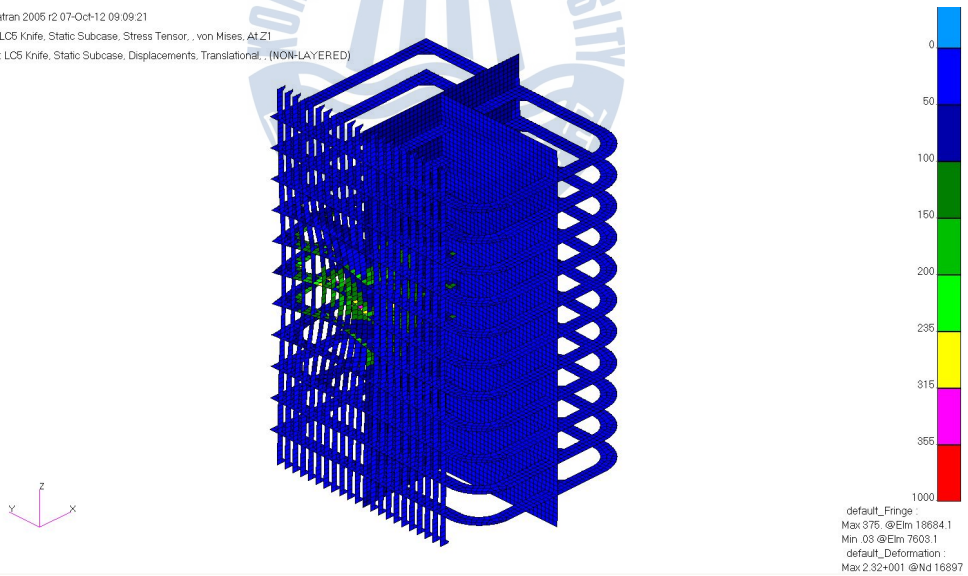
그림 3.19 Ice Knife Case 2의 von-Mises Stress

MSC Patran 2005 r2 07-Oct-12 09:06:59
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



(a) 기둥 전체의 von-Mises Stress

MSC Patran 2005 r2 07-Oct-12 09:09:21
 Fringe: LC5 Knife, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z1
 Deform: LC5 Knife, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)



(b) 기둥 내부재들의 von-Mises Stress

그림 3.20 Ice Knife Case 3의 von-Mises Stress

Ice Knife 형상에 따른 기둥 구조의 부위별 최대 von-Mises Stress를 표 3.4에 나타내었다.

표 3.4 Ice Knife 형상에 따른 최대 von-Mises Stress

(단위 : MPa)

구조부재 Case		외판	내부재 (Stiffener)	Stringer	Bulkhead	Ice Knife
Original	No Ice Knife	226	324	653	350	-
1	400x40 mm Flat Bar	155 (69 %)	231 (71 %)	457 (70 %)	293 (84 %)	140
2	400x40 mm 삼각형 구조	158 (70 %)	206 (66 %)	420 (64 %)	264 (75 %)	85
3	600x60 mm Flat Bar	149 (66 %)	166 (51 %)	375 (57 %)	237 (68 %)	68

(%) : Original 대비 증감 비율

부위별 최대 von-Mises Stress 감소폭은 Ice Knife 형상에 따라서 편차가 있지만, Ice Knife를 설치하는 경우 30 % ~ 50 % 정도의 Stress 감소 효과가 있다.

40 ~ 60 mm 두께의 Ice Knife 자체에 작용하는 Stress는 70 ~ 140 MPa로 비교적 작은 값이 계산되었는데, 실제 해역의 유빙 정보에 따라 적절한 치수 및 재질 선택이 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 반잠수식 시추선이 극지에서 운용할 경우 내빙구조 보강 측면에서 연구를 수행하였다.

선박 및 해양구조물의 내빙구조 보강규정에 대한 고찰 및 보강물량 산정, 그리고 규정에 따른 보강방법 이외에 유빙에 대한 선각 보강방안을 몇 가지 제안하였고, 보강방법에 대한 강도 평가를 수행하여 규정에 의한 내빙구조 보강 대비 어느 정도의 강도 개선효과가 있는지 기술하였다.

반잠수식 시추선의 내빙구조 보강 규정에 따른 선각 물량 증가비는 선박에 비하여 작았는데, 본 논문에서는 유한요소법에 따른 직접 강도 평가 시 선박에 적용되는 규정의 적용이 미흡한 부위에 대하여 고찰하였다.

본 논문에서는 유빙의 충격에 대비한 선각 보강방안으로 Tension Wire, Ring Clamp, Ice Knife 구조를 제안하였는데, 이들 방법은 향후 극지에서 운용하는 반잠수식 시추선의 설계 시 유빙에 대한 효과적인 선각 보강 방안이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 대한조선학회 편 (2011), 조선기술, pp. 573, 지성사
- [2] 노르웨이선급(DNV) 규정 (2012)
- DNV-OSS-101 : Rules for Classification of Offshore Drilling and Support Unit
 - DNV-OS-C101 : Design of Offshore Steel Structure
 - DNV-OS-C103 : Structural Design of Column Stabilized Units(LRFD method)
 - DNV-OS-E303 : Offshore Mooring Fibre Ropes
 - DNV-OS-E304 : Offshore Mooring Steel Wire Ropes
 - Ship Rule Part 5 Chapter 1 : Ships for Navigation in Ice
- [3] 국제선급협회(IACS) 통합규정 (2011)
- IACS UR I1 ~ I3 : Unified Requirement for Polar Ships
- [4] 영국선급(LR) 규정 (2012)
- Provision Rules for the Winterisation of Ships
 - Ship Rule Part 8 : Rules for Ice and Cold Operations
- [5] 미국선급(ABS) 규정 (2012)
- Guide for Vessels Operating in Low Temperature Environments
 - Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units
 - Steel Vessel Rule Part 6 Chapter 1: Strengthening for Navigation in Ice

[6] Finnish Transport Safety Agency (2010), Finnish-Swedish Ice Class Rules

[7] 전병영, 민준기, 최병기 (2012). “극지운항 선박의 빙하중 계산법에 관한 비교 연구”, 대한조선학회 춘계학술대회, 대구



감사의 글

학교를 졸업한 뒤 10여년이 지난 늦은 나이에 다시 공부할 수 있게 해주신 많은 분들께 감사드립니다.

부족한 저를 근무병행유학생 추천 해 주셨던
윤명철 님, 김화수 님, 이병록 님

회사 업무를 나누어 가지며 도와주신
서영호 님과 이도형 님, 그리고 과원 님들

나이 많은 아저씨를 형, 오빠처럼 대해준
실험실 동료들 그리고 입학 동기 정석이

큰 산처럼 언제나 우직하시고, 잘 이끌어주신 멋진
최경식 교수님

강의와 공부로 바쁘다는 투정을 애교로 받아준
참한 차선생님, 숙녀가 되어가는 믿음직한 큰 딸 소혜, 언제나 밝은
귀염둥이 막내 딸 소원

이제 졸업을 하여 숙제와 시험이 없어진다는 시원함과 자유롭게 공부할 수
있는 시간이 없어진다는 아쉬움이 교차 하지만, 많은 경험을 한 지난 2년이 좋
은 추억으로 남습니다.

2013년 2월
민준기